

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Technické možnosti ovlivnění tvarových a rozměrových
charakteristik obrobku při řezání vysokorychlostním abrazivním
vodním paprskem na X-Y řzacím stole

Technical Possibilities of Influencing the Workpiece Shape and
Dimensional Characteristics during Cutting with High-Speed
Abrasive Water Jet on X-Y Cutting Table

Student:

Bc. Jakub Ormaniec

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Ormaniec**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Technické možnosti ovlivnění tvarových a rozměrových charakteristik
obrobku při řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem na
X-Y řezacím stole
Technical Possibilities of Influencing the Workpiece Shape and
Dimensional Characteristics during Cutting with High-Speed Abrasive
Water Jet on X-Y Cutting Table

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Důvody pro použití korekčních systémů při výrobě obrobku.
3. Experimentální ověření vlivu moderních korekčních systémů na technických materiálech.
4. Analýza a interpretace naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [3] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.


Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016





doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 10. května 2016



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 10. května 2016



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jakub Ormaniec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sousedská 60, Orlová – Lutyně, 73514.

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. a konzultantce paní doc. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za poskytnutí cenných rad při zpracování diplomové práce. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu při celém studiu na vysoké škole.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Ormaniec, J. *Technické možnosti ovlivnění tvarových a rozměrových charakteristik obrobku při řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem na X-Y řezacím stole: Diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2016, 67 s. Vedoucí práce: Sitek, L.

Diplomová práce se zabývá možnostmi ovlivnění tvaru a rozměrů kovových obrobků pomocí korekčních systémů naklápění řezné hlavy při řezání abrazivním vodním paprskem. Úvodní část je zaměřena na nekonvenční technologie obrábění, zejména pak na obrábění abrazivním vodním paprskem. V teoretické části jsou vysvětleny základní principy samotného řezání, popsány jednotlivé části stroje, typy paprsků a také kvalita povrchu a parametry, které ji ovlivňují. Další část práce je věnována korekčním systémům, které jsou užity v experimentu. Jedná se o Materiálové řízení rychlosti, Dynamickou poloměrovou korekci a systém ProgressJet. V praktické části je zkoumán vliv těchto korekčních systémů na různé materiály, u kterých je posuzována kvalita povrchu z hlediska drsnosti řezné plochy, vzniklého úkosu a doby potřebné k vyřezání vzorků.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Ormaniec, J. *Technical Possibilities of Influencing the Workpiece Shape and Dimensional Characteristics during Cutting with High-Speed Abrasive Water Jet on X-Y Cutting Table : Master's Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2016, 67 p. Thesis head: Sitek, L.

The master thesis deals with the possibilities of influencing the shape and dimensions of metal work pieces using correction systems, tilting the cutting head during cutting abrasive water jet. The first part is focused on unconventional cutting methods with special aim on cutting by high-speed abrasive water jet. Basic cutting principles, machine parts, jet types, surface quality and cutting parameters are explained in theoretical part. Another part of thesis is dedicated to correction systems used during the experiment. These systems are speed control with respect to used material, dynamic radius correction, and ProgressJet System. Correction systems influence on various materials is examined in practical part. Materials are evaluated according to their surface quality with respect to abrasiveness of cutting area, possible bevel and time necessary for sample cutting.

Obsah

Seznam použitých zkratk a veličin	8
Úvod	10
1. Nekonvenční metody obrábění	12
1.1 Rozdělení nekonvenčních metod	13
2. Technologie vysokorychlostního vodního paprsku	21
2.1 Historie vodního paprsku	21
2.2 Obrábění čistým vodním paprskem	22
2.3 Obrábění abrazivním vodním paprskem	22
2.4 Části stroje pro řezání AWJ	23
2.5 Typy používaných paprsků	26
2.6 Kvalita povrchu po obrobení AWJ	27
2.7 Faktory ovlivňující hloubku a kvalitu řezu	28
2.8 Další možnosti využití vodního paprsku	30
2.9 Korekční systémy	32
3. Praktická část	35
3.1 Materiál vzorků	36
3.2 Zkušební vzorky	38
3.3 Měření nerovností řezného povrchu	41
3.4 Měření úkosů	50
3.5 Čas výroby vzorků	56
3.6 Rozbor výsledků	57
Závěr	60
Seznam použité literatury	62
Seznam příloh	67

Seznam použitých zkratek a veličin

Zkratka	Význam
a	Průměrná horní hodnota [mm]
A	Tažnost [%]
AJM	Abrasive Jet Machining (Obrábění proudem vzduch a abraziva)
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
ASJ	Abrasive Slurry Waterjet (Abrazivní suspenzní paprsek)
AV ČR	Akademie věd České republiky
AWJ	Abrasive Water Jet (Abrazivní vodní paprsek)
AWJM	Abrasive Water Jet Machining (Obrábění vodním paprskem s abrazivem)
b	Průměrná spodní hodnota [mm]
c	Tloušťka materiálu [mm]
CAD	Computer aided design (2D a 3D počítačové projektování, navrhování)
CAM	Computer aided manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
CM	Chemical Machining (Chemické Obrábění)
NaOH	Chlorid sodný
CNC	Computer Numeric Control (Číslicové řízení počítačem)
CNC	Computer Numeric Control (Počítačové číslicové řízení)
EDM	Elektro Discharge Machining (Elektroerozivní obrábění)
ČSAV	Československá akademie věd
DRC	Dynamic Radius Correction (Dynamická poloměrová korekce)
EBM	Electron Beam Machining (Obrábění elektronovým paprskem)
ECM	Elektrochemical Machining (Elektrochemické obrábění)
H ₂ SO ₄	Kyselina sírová
HNO ₃	Kyselina dusičná
IBM	Ion Beam Machining (Obrábění iontovým paprskem)
LBM	Laser Beam Machining (Obrábění paprskem laseru)
MFC	Materiálové řízení rychlosti
NMO	Nekonvenční metody obrábění
PBM	Plasma Beam Machining (Obrábění paprskem plazmy)
Q	Kvalitativní stupeň řezu
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu [μm]
Rm	Pevnost [MPa]

R _p	Mez kluzu [MPa]
SiC	Karbid křemíku
USM	Ultrasonic Machining (Technologie obrábění ultrazvukem)
WJM	Water Jet Machining (Obrábění čistým vodním paprskem)
α	Úhel úkosu [°]

Úvod

Předmětem předkládané diplomové práce je řezání abrazivním vodním paprskem. Jedná se o jednu z nekonvenčních metod obrábění, která je ve strojírenství dlouhodobě využívána.

Práce se dělí na dvě části – teoretickou a praktickou. První kapitola se zaměřuje na specifika nekonvenčních metod obrábění a zasazuje téma obrábění vysokorychlostním paprskem do kontextu ostatních nekonvenčních metod. Jednotlivé metody tato kapitola přehledovým způsobem blíže vysvětluje. Druhá kapitola teoretické části práce představuje technologii vysokorychlostního vodního paprsku. V jejím úvodu je zmíněna také historie využívání energie vodního proudu. Následující podkapitola se zaměřuje na dvě hlavní metody obrábění, a to obrábění pomocí čistého vodního paprsku a obrábění pomocí vodního paprsku obohaceného o abrazivní částice. V práci je dále popsán stroj pro řezání AWJ (Abrazivní vodní paprsek) a jeho jednotlivé části (zdroj vysokotlaké kapaliny, akumulátor, vysokotlaké vedení, abrazivní tryska a lapač energie paprsku). Jsou také vysvětleny jednotlivé typy vodních paprsků podle způsobu jejich vytváření. Pozornost je také věnována kvalitě povrchu po obrobení AWJ a faktorům, které ovlivňují hloubku a kvalitu řezu. Součástí teoretické části je také představení možností využití vodního paprsku, její závěr je pak věnován samotným korekčním systémům – jejich účelu a funkci.

Praktická část zkoumá pomocí experimentu vliv korekčních systémů na kvalitu a rozměry povrchu. Konkrétně se zabývá měřením těchto vlastností: drsnost povrchu, vznik možného úkosu a doba trvání řezu. Test je proveden na čtyřech materiálech, které se výrazně liší svými fyzikálními i chemickými vlastnostmi.

Práce vychází z poznatků autora získaných v bakalářské práci s názvem: *Vliv moderních korekčních systémů nakládění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem*, která zkoumala vliv korekčních systémů na kvalitu a rozměry obrobku na jednom druhu materiálu. Diplomová práce rozšiřuje získané poznatky o užití jiných druhů materiálu. Do procesu řezání navíc vstupují různé parametry, jako například doba trvání řezu či vliv hmotnostního průtoku abraziva. Práce zaznamenává dobu trvání výřezu za užití korekčního systému a porovnává ji s dobou řezání bez jeho užití.

Cílem práce je tedy zjistit, jak vybrané korekční systémy pracují na čtyřech konkrétních materiálech. K dosažení tohoto cíle jsou jednotlivé vzorky zkoumány

z hlediska drsnosti povrchu při různé kvalitě řezu, různého hmotnostního průtoku abraziva, možného vzniku úkosu a z hlediska doby trvání výřezu. Pro lepší znázornění jsou výsledky výzkumu zaznamenávány v grafické podobě. Grafy zobrazují jak nerovnosti povrchu řezných ploch a vzniklé úkosy, tak čas potřebný k vytvoření vzorku.

1. Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění (NMO) jsou známy již několik desítek let, přesto se pro ně stále používá toto označení. V praxi se můžeme setkat také s termíny progresivní či fyzikální metody obrábění. Obecně je však pojem nekonvenční metody stále užíván nejčastěji, neboť je dlouhodobě zažitý. [1]

NMO nepoužívají mechanickou práci při úběru materiálu tak, jak je tomu u klasického třískového obrábění. Hlavním rozdílem je, že zatímco u klasického obrábění je obrobitelnost materiálu limitována mechanickými vlastnostmi (tvrdost, pevnost), u NMO jsou to především fyzikální vlastnosti (elektrická vodivost, tepelná vodivost, teplota tavení) a chemické složení obrobku, což dává těmto metodám obrovskou výhodu. NMO umožňuje zpracování těžkoobrobitelných materiálů, které by bylo ekonomicky velmi obtížné vyrobít konvenčním způsobem. [1], [2], [3]

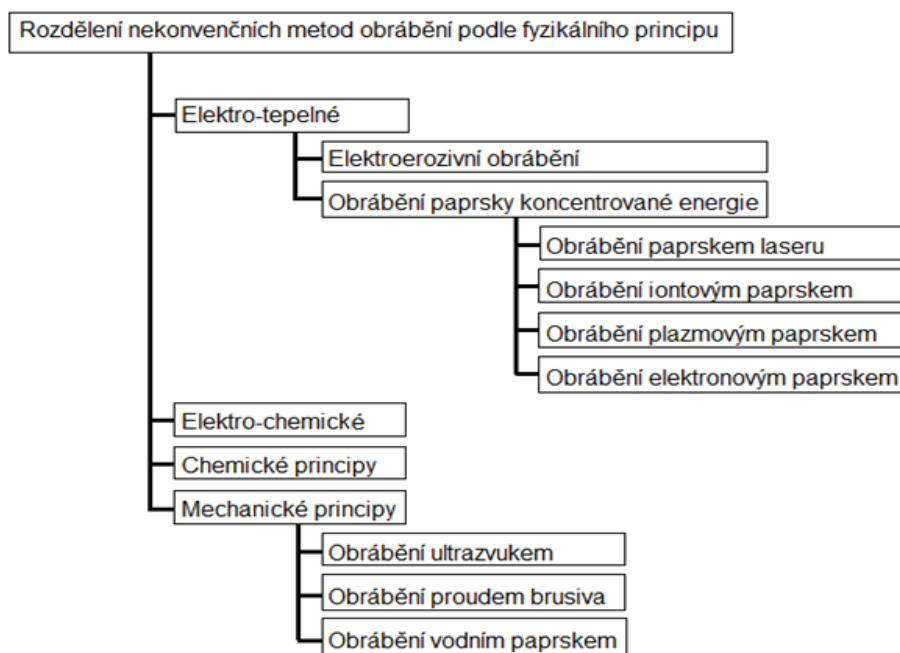
Jiní autoři uvádějí jako rozdíl mezi konvenčním a nekonvenčním způsobem obrábění také skutečnost, že při nekonvenčním obrábění nedojde k přímému kontaktu materiálu s obráběcím nástrojem. Dochází k němu prostřednictvím paprsku, elektrody nebo drátu. [4], [5]

Nekonvenční metody se v technické oblasti začaly využívat z důvodu potřeby obrábět vysoce pevné materiály, uplatnění nalézaly především v kosmickém a leteckém průmyslu. K dalšímu zdokonalování těchto technologií docházelo kvůli zvyšujícím se nárokům na tvarovou a rozměrovou přesnost obrobku. Dnes jsou již běžnou součástí strojního parku se schopností obrábět s přesností na 1 μm . [4]

Materiál nástroje nemusí být tvrdší, než je obráběný materiál. Nekonenční metody obrábění umožňují provádět velmi složité technologické operace, které by nebylo možno provést klasickým třískovým obráběním. Kocman dále uvádí, že po použití NMO může dojít k řízené změně vlastností v povrchové vrstvě obrobku. Pro nekonvenční obráběcí metody jsou často využívány CNC řídicí systémy, které rozšiřují oblast jejich použití. Tyto systémy především řídí cykly pohybů a úběr obráběného materiálu. Standardní řízení těchto strojů probíhá ve třech osách, některé jsou vybaveny až šestiosým řízením. [6], [7]

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod

Technologie NMO, jež jsou dále podrobněji popsány, lze rozdělit podle fyzikálního účinku použitého při obrábění. Takto je můžeme členit na elektro-tepelné, elektro-chemické, chemické a mechanické. Podrobněji zmíněné rozdělení znázorňuje obrázek 1.1. [1]

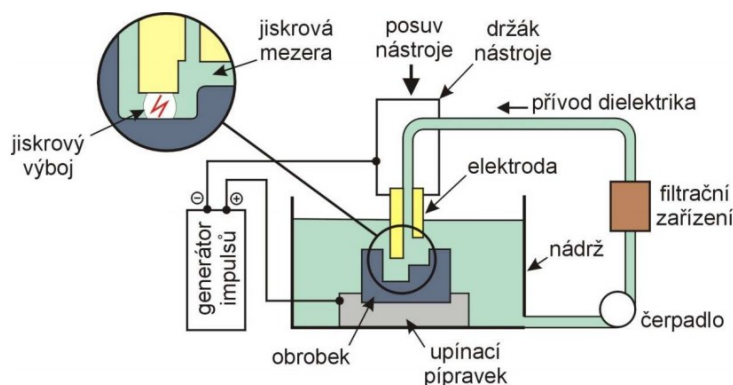


Obr. 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod [1]

Elektroerozivní obrábění (EDM – Electro Discharge Machining)

a) Elektrojiskrové hloubení (Ram EDM)

Úběr materiálu (pouze elektricky vodivého) je způsoben periodicky se opakujícími elektrickými výboji mezi nástrojem a obrobkem (obr. 1.2). Následkem toho jsou tavením a vypařováním z obráběného materiálu odstraňovány velmi malé částice (okem neviditelné). Tyto částice mají tvar kuliček a z místa obrábění jsou odplavovány pomocí dielektrické kapaliny. Jedná se o kapalinu s vysokým elektrickým odporem (např. petrolej, lehké strojní oleje, vodní sklo a destilovaná voda) vyplňující prostor mezi elektrodami (0,01 až 0,50 mm). [1], [7]



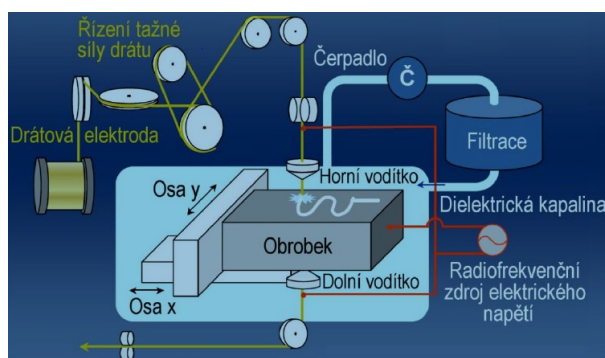
Obr. 1.2 Zařízení pro elektroerozivní obrábění [8]

Doba přerušení toku elektrického proudu umožní kapalině, proudící z místa narušení, odplavit všechny vzniklé mikročástice. Aby se ve stejném místě neudržel plynulý výboj, musí být přerušení delší, než je čas deionizace kapaliny.[1]

Parametry elektroerozivního obrábění jsou určeny tvarem a energií impulsů, typem a vlastnostmi dielektrika a velikostí jiskrové mezery. Elektroerozí se obrábí spékane karmby, kalené oceli, wolfram, tantal, titan, magnetické slitiny a také se jí hloubí velmi malé otvory až do průměru 0,02 mm. [1], [5]

b) Elektrojiskrové řezání (Wire EDM)

Elektrojiskrové řezání se využívá především při výrobě střížných a lisovacích nástrojů a při řezání pevných a tvrdých materiálů. Jedná se o metodu elektrojiskrového obrábění, pro kterou je charakteristická minimální šířka řezu. Přes vodící zařízení je veden tenký drát, který prochází místem řezu, a plní funkci nástrojové elektrody (obr. 1.3). Dráty jsou nejčastěji z mosazi ($\varnothing 0,33 - 0,35$) nebo, pro velmi jemné řezy, z molybdenu ($\varnothing 0,03 - 0,07$). Drát je napínán konstantní tahovou silou a dielektrická kapalina zaplňuje prostor mezi drátem a obrobkem.

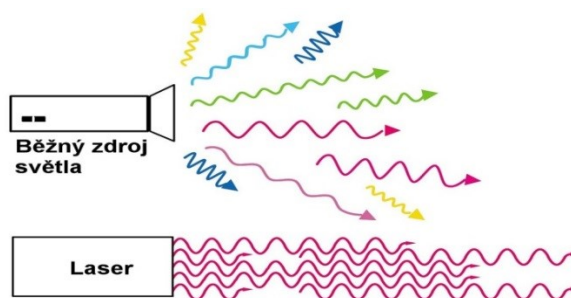


Obr. 1.3 Princip elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou [1]

Obrábění paprskem laseru (LBM - Laser Beam Machining)

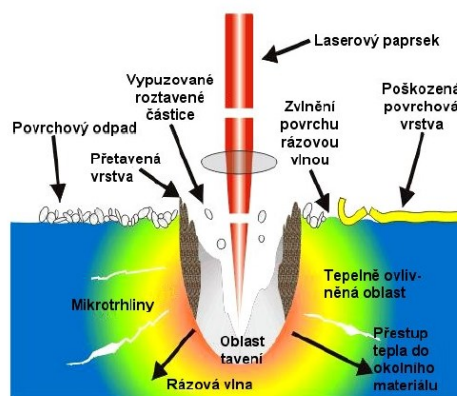
Pojem laser pochází z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což popisuje jeho funkci a v překladu znamená „zesílení světla pomocí vybuzečné emise záření“. [9]

Laserové záření se od záření vycházející z běžného světelného zdroje liší (obr. 1.4). Zatímco vlnová délka běžného světla je různá, laserový paprsek je monochromatický, tedy má přesně definovanou délku. Fotony se pohybují ve svazku stejným směrem a jsou v jeho průřezu buď stejněsměrně, nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny. [1], [10]



Obr. 1.4 Vyzařování běžného zdroje světla a laseru [1]

Tenký paprsek laseru dopadá na velmi malou plochu obráběného materiálu (obr. 1.5). Zde se mění světelná energie záření na energii tepelnou. Dochází k místnímu ohřevu částic materiálu na vysokou teplotu (až 10 000 °C), která způsobí jejich roztavení a následné vypaření. Mezi parametry ovlivňující tento proces patří vlnová délka, intenzita záření, režim ozařování a také absorpční a tepelné vlastnosti ozářeného kovu. Metoda se používá především pro řezání tvarově složitých výrobků z plechu, vrtání, gravírování a značení. [10], [4]



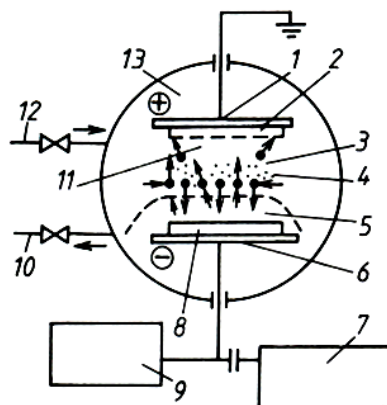
Obr. 1.5 Řezání laserem [1]

Obrábění iontovým paprskem (IBM – Ion Beam Machining)

Iontový paprsek je svazek vysokoenergetických iontů inertního plynu (argon, krypton, xenon), které mohou být řízené a zrychlené elektrickým proudem. Tyto plyny mají vysokou kinetickou energii. Pracovní napětí pro ionizaci prostředí je 300-500 V. [1], [10], [11]

Celé obrábění probíhá ve vakuu (obr. 1.6). Pomocí urychlovacího napětí bombardují povrch obrobku nabité atomy (ionty). Při jejich dopadu se v důsledku pružné srážky uvolní atomy z obrobku. Intenzita uvolnění závisí na proudové hustotě, energii dopadajících iontů (300 - 500 eV), na poměru hmotnosti iontů a atomů materiálu a také na úhlu dopadu. Obrábění za pomoci iontového paprsku často probíhá přes krycí masku, která má tvar obrobené plochy. [1], [11]

Technologie IBM je využívána především při výrobě integrovaných obvodů, polovodičů, součástek pro mikrotechniku, pro leštění čoček, výrobu miniaturních součástí a pro hlazení povrchu. [12]



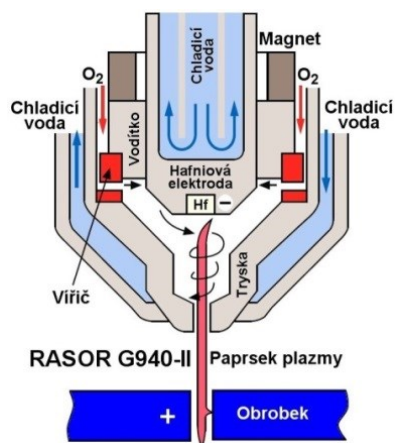
Obr. 1.6 Obráběcí iontové zařízení [12]

(1 - anoda, 2 - depozitní vrstva, 3 - elektrony, 4 - ionty, 5 - krycí maska,
6 - katoda, 7 - oscilátor, 8 - obrobek, 9 - voltmetr, 10 - vývěva,
11 - plazma, 12 - přívod argonu, 13 - vakuum)

Obrábění plazmovým paprskem (PBM – Plasma Beam Machining)

U této metody dochází k obrábění materiálu postupným odtavováním, odpařováním a rozprašováním paprskem plazmy, který vychází vysokou rychlostí z hořáku. [7]

Plazmu lze definovat jako elektricky vodivý stav plynů, obsahující směs pozitivně nabitých iontů, volných elektronů a neutrálních atomů. Její teplota se pohybuje v rozmezí 10 000 až 30 000 °C. Vytváří se rozpadem molekul při průchodu elektrickým obloukem. Ten hoří mezi netavící se elektrodou (nejčastěji wolframovou katodou) a obráběným materiálem (anodou). Důležitou částí zařízení je plazmový hořák (obr. 1.7), který musí zabezpečit přívod proudu na elektrodu, přívod pracovních plynů, tvarování plazmového oblouku a usměrnění paprsku do obráběného místa. [1], [7], [10]

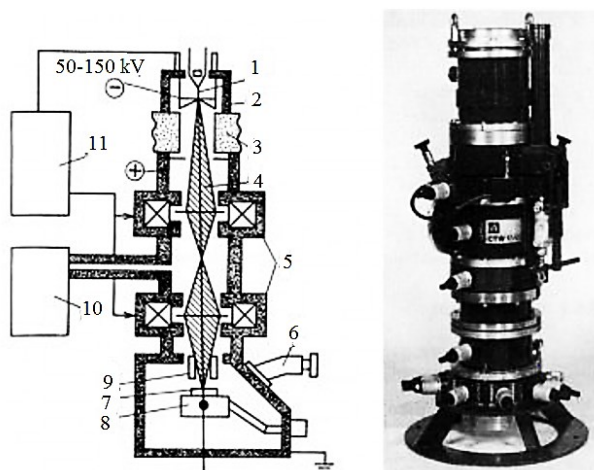


Obr. 1.7 Plazmový hořák [13]

Obrábění elektronovým paprskem (EBM – Electron Beam Machining)

Technologie EBM využívá soustředěný svazek urychlených elektronů, který velmi vysokou rychlostí (až $\frac{3}{4}$ rychlosti světla) dopadá na malou plochu obráběného materiálu. Kinetická energie elektronů se přemění nejčastěji na tepelnou energii (5000 – 6000 °C), dále pak může působit například chemicky nebo fyzikálně změnami struktury či složení. Dochází tedy k tavení a vypařování materiálu obráběné součásti. Celý proces obrábění elektronovým paprskem probíhá ve vakuu. [1], [4]

Elektrony jsou vysílány katodou (wolframový nebo tantalový drát) ve tvaru vlásenky. Při průchodu zaostřovací anodou se elektrony z důvodu velkého potenciálního rozdílu výrazně urychlí. Svazek elektronů dále prochází elektromagnetickou čočkou, v níž je usměrněn do pracovního místa. Schéma zařízení je znázorněno na obrázku 1. 8. [14]



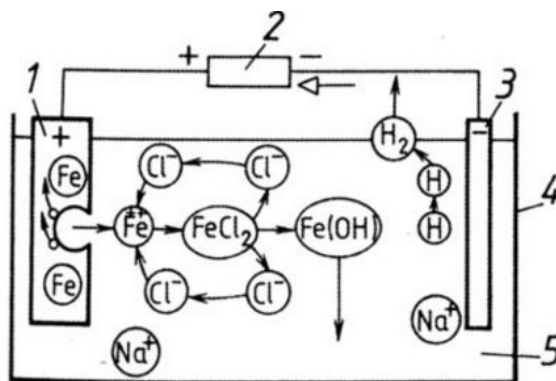
Obr. 1.8 Schéma zařízení pro obrábění elektronovým paprskem [1]

*(1 - wolframový drát, 2 - elektronové dělo, 3 - izolátor, 4 - elektronový paprsek,
5 - elektromagnetické čočky, 6 - průzor, 7 - obrobek, 8 - pracovní stůl,
9 - elektrostatické vychylování elektronového paprsku, 10 - vývěvy,
11 - napájecí zdroj)*

Elektrochemické obrábění (ECM – Electrochemical Machining)

Jedná se o beztržiskovou metodu obrábění pouze elektricky vodivých materiálů. Využívá vlastností elektrického proudu působící na elektrolyt. Podstatou metody je fyzikální jev zvaný elektrolyza. Hlavní zákonitosti jsou dány Faradayovými zákony, teorií elektrolytů a termodynamikou galvanických článků. [10], [15]

Při tomto typu obrábění jsou nástroj, katoda i obrobek (anoda) ponořeny do elektrolytu (obr. 1.9). Zde dochází k reakci, při které se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu na povrchu obrobku a postupně rozrušují (ubírají) kov z anody. Katoda má shodný tvar jako výsledný výrobek. Největší úběr materiálu nastává v místech s nejkratší vzdáleností mezi anodou a katodou, tedy tam, kde je největší hustota elektrického pole. Je potřeba zajistit, aby zůstala konstantní jak pracovní mezera (0,025 až 1,3 mm), tak teplota, rychlost proudění a složení elektrolytu. Jako elektrolyt se používají roztoky kyselin (kyselina sírová nebo fosforečná), nebo alkalické roztoky (dusičnan sodný, chlorid sodný apod.). [1], [10], [15]



Obr. 1.9 Princip elektrochemického obrábění [15]

(1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda),
4 – pracovní vana, 5 – elektrolyt)

K hlavním aplikacím patří výroba tvarově složitých ploch, obrábění materiálů s vysokou tvrdostí a pevností a součástí s malou tuhostí, které by se mohly při klasickém obrábění deformovat. Metodou ECM lze frézovat, vrtat, řezat a brousit. Dosahovaná rozměrová přesnost je 0,02 až 0,05 mm s drsností povrchu $R_a = 0,1$ až $0,8 \mu\text{m}$. [7]

Chemické obrábění (CM – Chemical Machining)

Jedná se o proces, při kterém dochází k řízenému odleptávání (odstranění) materiálu o tloušťce několika setin milimetru až několik milimetrů z povrchu obrobku. Odleptávání je způsobeno chemickou reakcí mezi obráběným materiálem a reaktivním prostředím. Reaktivní prostředí je sloučenina standardně používaných chemikálií (NaOH , HNO_3 , H_2SO_4) spolu s přísadami na zvýšení smáčivosti. Složení se pak mění podle druhu obráběného materiálu. Pro ocel a hliník se nejčastěji používají kyseliny, pro nikl a měď zásady. [10]

Místa, které mají zůstat neporušená, jsou zakryta tzv. maskou. Na povrch se nanáší štětcem nebo nástřikem do tloušťky 0,2 - 0,4 mm. Používají se polyvinyllové, polyamidové pryskyřice nebo speciální laky, které umožňují leptání až po dobu 10 hodin. [1], [10]

Chemické obrábění je výhodné zejména při úběru materiálu malých tlouštěk z obrobků velkých plošných rozměrů a složitých tvarů. Dále se používá k výrobě mělkých, tvarově složitých reliéfů, obrábění tenkostěnných materiálů (nedochází k deformaci obrobku) a výrobě děr do tenkostěnných trubek a fólií. [7], [15]

Obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic Machining)

Při této metodě je úběr materiálu zajištěn společným působením mechanického účinku abrazivních zrn spolu s kavitačním a chemickým účinkem kapaliny. Nástroj kmitá ultrazvukovou frekvencí 20 až 30 kHz. Mezi nástroj a obrobek je přiváděna kapalina (petrolej, voda) s abrazivními zrny (karbid boru, karbid křemíku a elektrokorund). Abraziva jsou nástrojem přitlačována konstantní silou na obráběný povrch, což umožní přenesení tvaru aktivní části nástroje do obrobku (obr. 1.10). Brusná zrna svou energií rozrušují obráběný povrch a kavitační účinky umožní odplavení třísek.



Obr. 1.10 Princip metody obrábění ultrazvukem [1]

Obrábění ultrazvukem se využívá zejména při řezání tvrdých materiálů do tloušťky 5 mm. Dále se používá pro hloubení průchozích otvorů a dutin, zejména do skla či keramiky a při broušení rovných ploch. Touto technologií lze opracovávat tvrdé a křehké materiály (grafit, keramika, sklo, křemík, kompozity, slinuté karbidy apod.). Měkké materiály se ultrazvukem obrábět nedají, protože v nich ulpívají zrna abraziva. [4]

Obrábění proudem vzduchu a abraziva (AJM - Abrasive Jet Machining)

Využívá se spojení tuhých těles (abrazivních částic) se vzduchem proudícím vysokou rychlostí. Základem zařízení pro obrábění je vysokotlaký kompresor, rozvod tlakového vzduchu a tryska, která umožní nasátí abraziv do pracovního média. Mezi používaná abraziva patří oxid hlinitý (Al_2O_3) nebo karbid křemíku (SiC). Hlavní aspekty ovlivňující tento proces jsou tlak vzduchu, úhel dopadu, velikost brusných částec, rychlost pohybu a vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem. Síly působící na obrobek jsou malé a vzhledem k tomu, že proud vzduchu ochlazuje místo opracování, nedochází ani k zahřátí materiálu. [11]

2. Technologie vysokorychlostního vodního paprsku

V úvodu kapitoly je popsána historie vodního paprsku. Dále je tato technologie rozdělena podle pracovního média na dvě hlavní metody - obrábění čistým vodním paprskem a obrábění abrazivním vodním paprskem. Obě metody nacházejí uplatnění ve výrobním procesu. [10], [16]

2.1 Historie vodního paprsku

Energie vodního proudu je využívána již odpradávná. Jednou z prvních aplikací bylo využití vodního proudu při těžbě nerostných surovin. V Rusku se okolo 30. let 20. století využívalo vodních děl při těžbě uhlí. V roce 1936 Peter Tupitsyn použil vodní proud k těžbě uhlí také na Ukrajině.

V 50. a 60. letech se vodní proud používal při těžbě uranu, protože redukoval rizika, která jsou s těžbou spojena (např. radiace). V této době také prováděl Dr. Norman Franz pokusy s ultravysokým tlakem vody (tlak větší než 200 MPa), převážně jím řezal dřevo. Pomocí experimentů dokázal, že vodní paprsek lze použít pro účely řezání. Dr. Franz je tak považován za otce vysokorychlostního vodního paprsku. [17]

První zařízení pro řezání abrazivním vodním paprskem bylo vytvořeno v 70. letech 20. století. Do používaného vodního paprsku byly přidány abrazivní částice, což zásadně změnilo pohled na tuto technologii a rozšířilo množství materiálů, které lze takto řezat. O rozvoj abrazivního vodního paprsku se výrazně zasloužil Dr. Mohamed Hashish z firmy Flow, který se zabývá problematikou kapalinových proudů dodnes. [17], [18]

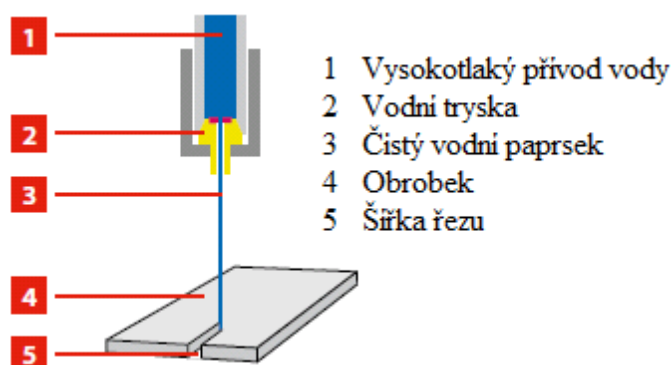
V 90. letech vznikalo mnoho vědeckých a vývojových pracovišť po celém světě, která se zabývala výzkumem vodního paprsku. Vodní a abrazivní vodní paprsek se začínal rozšiřovat do dalších oborů. Jednalo se o odstraňování povrchových vrstev, čištění, přípravu povrchů před sanací betonu, úpravu ploch, mletí částic, obrábění, využití v lékařství apod. [19]

Na území České republiky se výzkumem technologie vodního paprsku v 80. letech 20. století zabýval především prof. Jaroslav Vašek z Hornického ústavu ČSAV v Ostravě. Tyto prostory dnes slouží Ústavu geoniky AV ČR, který patří mezi světově uznávaná centra pro výzkum a vývoj kapalinových paprsků. [20]

2.2 Obrábění čistým vodním paprskem (WJM - Water Jet Machining)

Čistý vodní paprsek s vysokou rychlostí proudění (600 až 900 m.s^{-1}) a vysokou kinetickou energií dokáže řezat (obrábět) materiál díky mechanickému účinku, který vzniká při jeho dopadu na řezanou oblast. Paprsek je vytvořený vysokým tlakem vody (až 700 MPa , běžně 400 MPa) a jejím průchodem přes otvor trysky (obr. 2.1) o průměru obvykle $0,075 - 0,35 \text{ mm}$. Dále přechází do materiálu, kde postupně ztrácí svou energii, a při řezání dochází k jeho typickému pohybu po zaoblené dráze. Rádus zaoblení se mění s tloušťkou obrobku, dále závisí na řezaném materiálu a rychlosti řezání. [1], [10] [21]

Vzhledem k tomu, že vodní paprsek pracuje velmi přesně, umožňuje řezání ostrých úhlů, malých poloměrů i jemných kontur. Další pozitivní vlastností je, že nedochází k tepelnému namáhání materiálu, protože kapalina má nízkou tepelnou kapacitu a dobrou tepelnou vodivost. Pro řezání touto technologií jsou vhodné zejména měkké materiály včetně výrobků z papíru, plastů, těsnících materiálů, pěn, textilu a potravin. [5], [22]



Obr. 2.1 Schéma hlavice pro řezání čistým vodním paprskem [22]

2.3 Obrábění abrazivním vodním paprskem (AWJM – Abrasive Water Jet Machining)

Rozrušení materiálu za pomoci pouze vodního paprsku je velmi malé. Byly proto zkoumány metody pro zvýšení jeho efektivity. Zjistilo se, že pokud obohatíme vodní paprsek o abrazivní částice, zvýší se stokrát až tisíckrát jeho účinnost. [11]

Do řezací hlavice (obr. 2.2) je přivedena voda pod vysokým tlakem. Po průchodu tryskou se urychlí a ve směšovací komoře se smísí s abrazivem. Vznikající abrazivní vodní

paprsek (AWJ) je pomocí trubice zaostřován na konkrétní místo řezaného obrobku. Zde odděluje třísky (mikrotřísky) a zároveň je odplavuje mimo pracovní prostor. Takto obrobená plocha je lepší z hlediska kvality než plocha obrobená samotným vodním paprskem. [5], [11]



Obr. 2.2 Schéma hlavice pro řezání abrazivním vodním paprskem [23]

Lze říci, že pro řezání touto technologií jsou vhodné téměř všechny materiály, nejsou-li znehodnocovány kontaktem s vodou. Jedná se o všechny druhy oceli, neželezné kovy, všechny druhy plastů, sklo, keramické materiály, dřevo, mramor, kůže a další textilní materiály, ale také třeba diamant. [4]

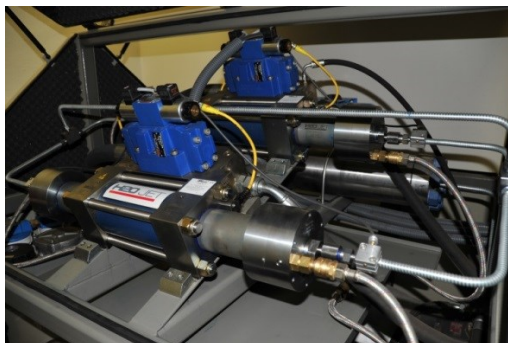
2.4 Části stroje pro řezání AWJ

Stroj pro řezání AWJ se skládá z několika částí. Patří mezi ně zdroj vysokotlaké kapaliny, akumulátor, vysokotlaké vedení, abrazivní řezná hlavice a lapač energie paprsku. Všechny uvedené části budou blíže specifikovány v následující kapitole.

Zdroj vysokotlaké kapaliny

Pro vytvoření vysokorychlostního vodního paprsku se používají dva druhy zařízení. Americká firma Flow systems používá u svých zařízení multiplikátor. Zařízení s triplexovým plunžrem naopak preferuje firma Sugino Machine se sídlem v Japonsku. [24]

1. Multiplikátor (obr. 2.3) je složen ze dvou částí. Do první části je střídavě přiváděn olej před a za píst. Ta je pak spojena s pístnicemi na obou stranách, které působí v další části na řeznou kapalinu a vytvářejí požadující tlak. Rozhodujícím faktorem pro to, jaký bude výsledný tlak, je poměr velikosti průměru pístu a pístnic. Změna polohy pak způsobuje pulzaci kapaliny, proto je potřebné umístit za tuto část okruhu akumulátor tlakových nárazů. [10], [24],



Obr. 2.3 Multiplikátor

2. Plunžrové čerpadlo (obr. 2.4) se používá pro nízké a střední tlaky do 280 MPa. V nitru zařízení se nachází dlouhé plunžry, které postupně nasávají kapalinu do válců. Po stlačení dochází ke zvýšení tlaku a otevření výtlačného ventilu. Kapalina dále putuje vysokotlakým vedením do pracovního prostoru. [11], [25]



Obr. 2.4 Plunžrové čerpadlo

Akumulátor tlaku

Jak již bylo zmíněno, akumulátor tlumí rázy vody vznikající v multiplikátoru. Nádoba je tlustostěnná a upravovaná tzv. autofretáží. (přetlakování nádoby za účelem zpevnění a tím zamezení vzniku makro a mikro trhlin). Úlohou akumulátoru je tedy udržení stejného tlaku a rychlosti proudící vody. [4], [10]

Vysokotlaké vedení

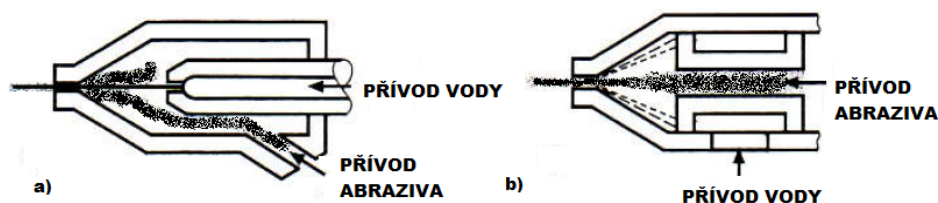
Dnes jsou všechny komponenty pro dopravu vysokotlaké kapaliny normalizovány a standardizovány. Jsou vyrobeny z oceli vysoce pevné a odolné proti korozi. Spoje a armatury musí splňovat požadovanou kvalitu a těsnost. Dále je potřeba, aby potrubí bylo zčásti flexibilní a umožnilo pohyb řezné hlavy. To zaručí ohebné, speciálně konstruované hadice, které vydrží tlak vedené kapaliny. [10], [21], [24]

Abrazivní řezná hlavice

Z hlediska konstrukčního provedení se hlavice rozdělují na dva hlavní systémy:

1) Systém s přímým přívodem abraziva (AWJ - Abrasive Water Jet)

Do směšovací komory jsou přiváděna axiálním nebo radiálním způsobem zrna abraziv ze zásobníku (obr. 2.5). V ní dochází k jejich strhávání a urychlování paprskem vody. Z komory následně vychází abrazivní vodní paprsek. [1], [10]



Obr. 2.5 Abrazivní hlavice pro AWJ [10]

a) hlavice s radiálním přísuvem abrasiva

b) hlavice s axiálním přísuvem abrasiva

2) Systém s přímým vstřikováním abraziva (ASJ - Abrasive Slurry Jet)

Z tlakové nádoby se přivádí stlačená suspenze abraziva s vodou do speciální hlavice. Používané tlaky jsou obvykle do 100 MPa s průtokem suspenze kolem $20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$. [1]

Pokud porovnáváme tyto systémy, má ASJ vyšší účinnost a vyšší proudovou hustotu narážejících částic. Dále tento systém umožní použití hlavice kompaktní konstrukce a aplikaci užšího paprsku. Naopak u AWJ je největší výhodou možnost použít daleko větší tlak vody, (až 700 MPa) a tím zvýšit energii paprsku. Následkem toho lze řezat tvrdší materiály do větších hloubek apod. [10], [21], [24]

Lapač energie paprsku

Vodní paprsek, poté co projde skrz materiál, má určitou zbytkovou energii. Ta je následně zachycena v nádobě s vodou. Vzhledem k tomu, že při obrábění za pomoci AWJ paprsku může hladina zvuku dosahovat hodnot větších než je 105dB, slouží také k jeho tlumení. [10]

2.5 Typy používaných paprsků

Tato část práce obsahuje rozdělení vodních paprsků podle způsobu jejich generování. Dále je lze rozdělit také podle použité kapaliny, velikosti tlaku a přítomnosti abraziva.

Kontinuální paprsek

Kontinuální, tedy spojitý, vodní paprsek má stále stejnou energii po celý průběh řezání. Paprsek dopadá na povrch materiálu a způsobí nárazový tlak. Poté přejde do tlaku stagnačního (o řád nižší než tlak nárazový), při kterém probíhá zbytek procesu. Pro dělení materiálu je tato metoda nejrozšířenější. [14]

Pulzující paprsek

Kapalinový pulzní paprsek lze vytvořit za pomoci tlakových pulzací tlakové kapaliny před výstupem z trysky. Výstup paprsku z trysky je kontinuální, ale působením těchto pulzů vytéká proměnnou rychlostí. Vznikají kapky (shluky) vody, které způsobují po dopadu na povrch materiálu impaktní tlak (tlak přibližně 4krát až 20krát vyšší než tlak stagnační). Důsledkem cyklického zatížení dochází k únavovému a smykovému namáhání materiálu, což dále zvyšuje účinnost pulzujícího paprsku [24], [26]

V roce 2000 byl na Ústavu geoniky AV ČR zahájen intenzivní výzkum v oblasti pulzujících vodních paprsků. Byla vyvinuta a testována originální metoda generování paprsků, založená na vytvoření akustických vln působením akustického budiče na tlakovou kapalinu a na jejich přenos k trysce. Díky tomu lze vytvořit pulzační paprsek generující desítky tisíc pulzů za sekundu. [26]

Kavitační vodní proud

Kavitační vodní proud využívá známý jev, při kterém může dojít k porušení materiálu vlivem destrukčních sil kavitačních bublin. Kavitační paprsek se skládá z kontinuálního paprsku, v němž jsou obsaženy kavitační bubliny. Porušení materiálu tedy nastává pomocí destrukčních sil při zániku těchto kavitačních bublin. Vzhledem k nepravidelnému umístění bublin se používá tam, kde není vyžadována přesnost. [24]

Kryogenní vodní paprsek

Kryogenní paprsek funguje na stejném principu jako AWJ. Místo abrazivních částic jsou zde použity kuličky ledu nebo stlačeného CO₂. Kryogenní vodní paprsek se využívá převážně v potravinářském průmyslu, mohl by se uplatnit také v medicíně při řezání kostí atd. [11]

2.6 Kvalita povrchu po obrobení AWJ

Kvalita povrchu se posuzuje hlavně podle drsnosti obrobené plochy a zpevnění materiálu. Dále ji hodnotíme podle hloubky kvalitně obrobeného povrchu, výšky nerovností povrchu, vlnitosti povrchu, úhlu sklonu řezné plochy (kolmost, šířka řezné mezery, přesnost rozměrů při vyřezávání tvarů a vliv ohybu paprsku). [24]

Materiál po obrobení lze zařadit do 5 kvalitativních skupin označených Q1 až Q5. Pro Q1 platí, že byl obrobek pouze zhruba rozřezán. Rychlost posuvu byla vysoká a může být k odtržení obrobku nutná další síla. Také dochází k výrazným nepřesnostem na řezu. Naopak obrobky skupiny Q5 charakterizuje velmi vysoká kvalita s nejnižší drsností povrchu. Rychlost řezání u této skupiny je velmi nízká. V tabulce 2.1 jsou uvedeny hodnoty drsnosti a tvarové přesnosti odpovídající jednotlivým stupňům kvality. Vzhled jednotlivých stupňů kvality poté zobrazuje obrázek 2.6. [27]

Tab. 2.1 Orientační popis užívaných stupňů kvality řezu podle firmy CHPS s.r.o. [28]

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra v horní oblasti	Drsnost Ra v dolní oblasti	Tvarová přesnost horní oblasti	Tvarová přesnost dolní oblasti
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1
Q4	Kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2
Q3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Typ a síla materiálu
Q2	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Typ a síla materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné



Obr. 2.6 Kvalitativní stupně řezu [29]

2.7 Faktory ovlivňující hloubku a kvalitu řezu

Řezání materiálu pomocí abrazivního vodního paprsku je složitý hydrodynamický proces. Hlavním požadavkem je co nejekonomičtější provoz s co nejmenšími ztrátami. Cílem této kapitoly je zaznamenat hlavní faktory působící na proces dělení materiálu abrazivním vodním paprskem.

Tlak vody

Hlavním předpokladem použití AWJ pro řezání je vytvoření pracovního tlaku. Z hlediska hydrodynamiky se jedná o nejdůležitější faktor. Při zvyšování tlaku vody je dosaženo větší řezné hloubky a lze tedy zvyšovat řeznou rychlost, popřípadě redukovat spotřebu abrazivních částic. Rozhodujícími parametry pro zvolení správného tlaku jsou mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu. Mezi další faktory patří rychlost posuvu abrazivní hlavice, hmotnostní tok abraziva a vnitřní průměr zaostřovací trubice. [24], [25]

Průměr vodní trysky

V této části stroje dochází k samotné přeměně vysokotlaké vody na vysokorychlostní vodní proud. Ovlivňuje tedy výslednou kinematiku proudu. Při průchodu tryskou dochází ke změně průtoku kapaliny, a tím i k přeměně celkové energie. Čím je energie paprsku větší, tím hlouběji pronikne paprsek do materiálu. Tato skutečnost platí do určité hodnoty, která tak určuje optimální průměr vodní trysky. [24], [25]

Abraziva

Parametry abraziv jsou důležité pro konečný výsledek. Z materiálových vlastností je to hustota, tvrdost, pevnost a dále pak tvar a velikost abraziv. Podstatný je také vliv hmotnostního toku, kdy jeho zvýšení způsobí větší hloubku řezu. To ovšem platí jen do určité míry, po které se hloubka dále nezvyšuje. Je to dáno tím, že se ve vodním toku pohybuje více abrazivních částic způsobujících vzájemné kolize, a tím ztrátu kinetické energie. Při volbě abrazivních částic je potřeba zvážit i jejich ekonomické a ekologické aspekty. [25]

Rychlost posuvu

Rychlost posuvu hlavice při řezání má významný vliv na nerovnosti povrchu daného materiálu. Při pomalém posuvu má vodní paprsek dostatek času působit na konkrétní místo, a je tedy schopen vytvořit hlubší a čistější řez. Při zvýšení rychlosti se celkový čas obrábění urychlí, ale vzhledem k tomu, že paprsek nepůsobí na místo dostatečně dlouho, dojde k výraznému zhoršení kvality povrchu na děleném materiálu. [25]

Vzdálenost trysky od materiálu

Při zvětšování vzdálenosti trysky od materiálu dochází k rozšiřování paprsku. Následkem toho je ztráta tlaku a rychlosti kapaliny. Při malé vzdálenosti materiálu a trysky nastává rozrušování nejen v ose, ale částečně také v radiálním směru. Pokud je vzdálenost příliš velká, dojde pouze k deformaci materiálu nebo jeho únavovému poškození. [24]

Z hlediska technologického je výhodné, aby vzdálenost trysky od materiálu byla co nejmenší. Obvykle se při průmyslovém řezání nastavuje na vzdálenost 4 mm s ohledem na možné nerovnosti při řezání velkých obrobků. Tato vzdálenost je nastavena také při použití naklápěcích korekčních systémů řezací hlavice. [21]

Úhel sklonu paprsku

Materiál je nejčastěji řezán pod úhlem 90° . V současné době se však ukazuje, že větší hloubky i vyšší kvality řezu lze dosáhnout optimálním naklopením řezací hlavy. Proto jsou také využívány korekční systémy, které vhodným naklápěním řezné hlavy zvýší kvalitu řezné plochy. [25], [30]

Počet průchodů paprsku

Větší hloubky řezu docílíme opakovaným průjezdem po stejné dráze při nezměněných pracovních parametrech. Takto je možné dosáhnout požadované hloubky řezu i při sníženém tlaku nebo zvýšené řezné rychlosti. Opakovaný přechod po stejné dráze nezaručí stejný přírůstek hloubky řezu, protože dochází ke zhoršení odvodu již odřezaného materiálu a odporu na jeho stěnách.

Vzhledem k velkému počtu faktorů vstupujících do procesu obrábění abrazivním vodním paprskem je důležitá jejich optimalizace. [25]

2.8 Další možnosti využití vodního paprsku

AWJ paprsek se používá kromě tradičního dělení materiálu také pro soustružení, frézování, vrtání a gravírování především pro těžkoobrobitelné materiály. [10]

Soustružení

Obrábění rotačních součástí vodním paprskem předpokládá optimální řešení konstrukce strojů. Hlavní otáčivý pohyb kolem své osy vykonává obrobek a vedlejší posuvný pohyb koná abrazivní vodní paprsek upnutý v manipulačním prostředku. [11]

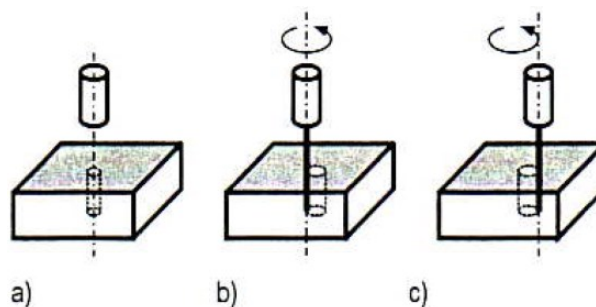
Úběr materiálu zaručí radiální přísun abrazivní hlavy do požadované hloubky (obrázek 2.7). Vzhledem k tomu, že při soustružení vzniká hrubý povrch, je používáno pro hrubovací operace, dokončení je většinou provedeno jinou technologií. Kvalita výsledného povrchu je závislá na mnoha parametrech (rychlost posuvu, tlak paprsku, velikost a smysl otáček, hloubka řezu a také typ, tvar a velikost abraziva). [10], [24]



Obr. 2.7 Soustružení pomocí AWJ [31]

Vrtání

Vodní paprsek se využívá k vrtání převážně u těžkoobrobitelných materiálů (keramika, sklo, niklové slitiny pro plynové turbíny apod.). Vrtání lze provádět třemi způsoby – buďto jsou paprsek i obrobek stacionární, nebo paprsek rotuje, případně vibruje se stacionárním obrobkem. Následující obrázek 2.8 ukazuje tyto techniky vrtání. [10]

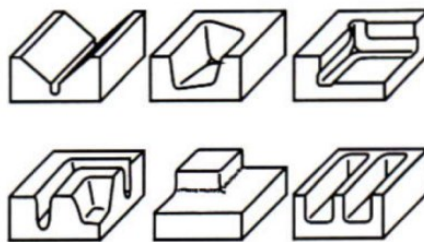


Obr. 2.8 Metody vrtání pomocí AWJ

a) převrtávání, b) vyřezávání, c) frézování otvorů [10]

Frézování

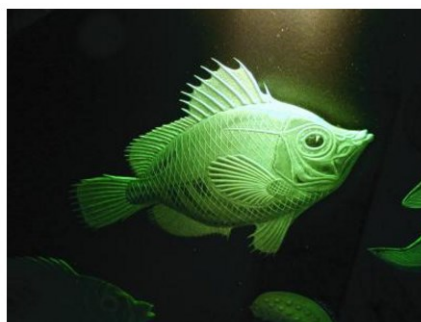
Hloubka řezu při frézování AWJ je menší než celková tloušťka materiálu, a tak nedochází k prořezání obrobku. Vodní paprsek přechází opakovaně po povrchu obrobku a postupně tak tvoří konečný tvar (obr 2.9). Metoda se používá pro obrábění skla, minerálů a tvarově složitých kovových i nekovových materiálů. Úzce pak navazuje na techniku gravírování. [32]



Obr. 2.9 Příklady frézování pomocí AWJ [10]

Gravírování

Podobně jako u frézování nedochází při gravírování k prořezání celé tloušťky obrobku. Dochází pouze k odstranění povrchové vrstvy do požadované hloubky, ve které je vodním paprskem vytvořen výsledný reliéf (obrázek. 2.10). Do finálního stavu se obrousí konečný tvar pomocí konvenčně užívaných nástrojů (diamantový hrot). Gravírování pomocí AWJ je stále používanější díky své schopnosti obrábět všechny druhy materiálů. [32]



Obr. 2.10 Gravírování reliéfu pomocí AWJ do skla [32]

2.9 Korekční systémy

Před tím, než bude zaznamenán vliv korekčních systémů v praktické části, je potřeba se zmínit o těchto systémech a jejich funkcích.

Při řezání vodním paprskem dochází vlivem kinematiky ke vzniku nerovností na řezaném povrchu. Právě korekční systémy se snaží těmto nerovnostem předejít. Dokáží eliminovat vznik podřezů v místech, kde vystupuje paprsek z materiálu, při změně směru řezání, k odstranění případného úkosu či soudkovitosti řezné plochy a ke zvýšení kvality plochy a přesnosti řezání. To vše by se mělo projevit také na zkrácení celkového času operace. [21]

V současné době jsou korekční systémy běžně součástí vysokotlakých řezacích systémů. V praktické části jsou použity tři korekční systémy výrobce vysokotlakých zařízení – firmy PTV s.r.o. z Hostovic.

Materiálové řízení rychlosti (MFC)

Materiálové řízení rychlosti se snaží zabránit vzniku zášlehů, podřezů, vymletin apod. Rychlost pohybu paprsku se dostane na takovou hodnotu, při které je nahoře i dole stejně široká řezná spára. Na této rychlosti zůstává po určité dráze (souvisí s tloušťkou materiálu), a poté se rychlost zvyšuje. Paprsek se naopak zpomalí, pokud se začne přibližovat k záhybu nebo ke konci trajektorie. Při zpomalení se rychlost paprsku drží na snížené hodnotě, aby se paprsek stihl srovnat do přímého směru. Systém určí vhodnou rychlost řezání pomocí algoritmu, který předpokládá chování paprsku tak, aby paprsek neopustil řeznou trajektorii o více než je potřeba. Při spuštění korekčního systému MFC bylo také zjištěno, že v závislosti na rychlosti nedochází pouze k zúžení a zpoždění paprsku na výstupu z materiálu, ale také ke změně šířky spáry na vstupu do materiálu. Na tento fakt reaguje další korekční systém DRC.

Dynamická poloměrová korekce (DRC – Dynamic Radius Correction).

Na základě testovacího řezu je určen maximální průměr paprsku, díky čemuž lze kompenzovat změnu šířky spáry. To umožní systému za pohybu odečíst hodnotu změny průměru, která byla odhadnuta.

Dynamická poloměrová korekce je stále vylepšována. Jednotlivé pokusy také ukazují, že větší význam tohoto systému je patrný při řezání tenkých materiálů, kdy rozdíl mezi nejširší a nejúžší spárou je největší.

ProgressJet

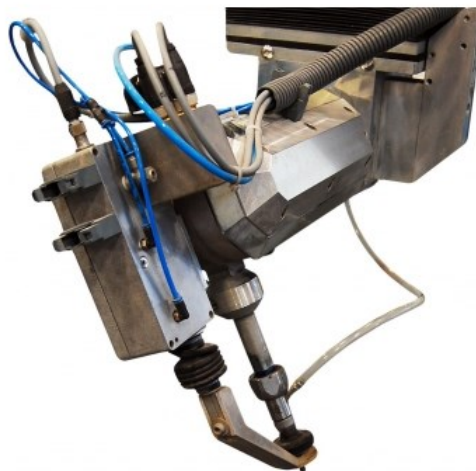
Při AWJ řezání dochází k technologickým chybám na ploše obrobku. Systém ProgressJet je schopný správným naklopením řezné hlavy vykompenzovat úkos, který vzniká při úbytku energie abrazivního vodního paprsku. Kompenzace úkosu může dosáhnout až 0.05 mm u běžných materiálů jako konstrukční ocel, slitiny hliníku, mosaz, titan, měď. Je tomu tak pouze u materiálů do tloušťky 60 mm. U vyšších rychlostí řezání hrozí určité riziko, že kompenzační pohyby jsou při změnách rychlosti a směru silnější a mohly by překročit dynamické vlastnosti stroje. [30]

Systém ProgressJet má následující vlastnosti: [33]

- *eliminuje chyby vzniklé energetickým úbytkem paprsku*
- *umožňuje realizovat kolmé výřezy a zároveň zvyšuje tvarovou přesnost výrobku*
- *vhodná pouze pro plošné aplikace řezání*
- *funkci zajišťuje přídatná 3D mechanika stolu řízená systémem CNC stolu na základě materiálové a technologické databáze*
- *umožňuje naklápění rotačních os v rozsahu $\pm 10^\circ$*
- *jeho funkce je plně řízena systémem CNC stolu*
- *nevyžaduje specializovaný 3D CAD-CAM⁶*

V současnosti se standardně objevují tyto korekční systémy u prodáváných strojů pro řezání technologií abrazivního vodního paprsku. Významné firmy zabývající se touto technologií mají své vlastní korekční systémy, které pracují na obdobném principu jako výše zmíněné systémy. Přesnost korekčních systémů se zvyšuje právě aplikací na konkrétních materiálech, zpětnou vazbou pak dochází ke zlepšování algoritmů.

Zmíněná firma PTV s.r.o dnes nabízí dva vylepšené systémy - ProgressJet 5AX a ProgressJet II 60°. Systém ProgressJet 5AX plní všechny funkce standardního ProgressJet systému. Jeho předpokládané využití spočívá v realizaci 3D výtvarů z deskových polotovarů, která je zajištěna naklápěním hlavy až do 45°. Dynamika polohování a přesnost je pak nižší. Systém ProgressJet II 60° umožňuje naklápění rotačních os v rozsahu až 60° (obr. 2.11). Navíc obsahuje laserový výškový senzor.



Obr. 2.11 Řezací hlava [33]

3. Praktická část

Tématem korekčních systémů jsem se zabýval již v předchozí závěrečné bakalářské práci s názvem: *“Vliv moderních korekčních systémů naklápění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem”*. [27] Tato práce zkoumala funkčnost tří korekčních systémů (MFC, DRC, ProgressJet). Vzhledem k zaměření své diplomové práce a užití stejných typů korekčních systémů, považuji tyto poznatky za přínosné, a proto na následujících řádcích krátce popíši výzkum a jeho výsledky, na které navazuji.

Funkčnost korekčních systémů byla v předchozím výzkumu testována na čtyřech vzorcích, při užití stejného materiálu AISI 316 Ti, o tloušťce 10mm. Při řezání jednotlivých vzorků byly parametry stroje nastaveny shodně. U výřezu vzorku č. 1 nebyl užit žádný korekční systém, na ostatních vzorcích pak byly postupně zapnuty jednotlivé korekční systémy, a to tak, že se zapnutí systému na sebe nabalovalo. Vzorek č. 2 byl tedy použit při zapnutí MFC, vzorek č. 3 za užití funkce MFC a DRC, a u posledního vzorku byly zapnuty všechny zmíněné systémy a rovněž ProgressJet. Při měření byla zjišťována rozměrová přesnost obrobku, nerovnosti řezného povrchu a úkos. Ukázalo se, že korekční systémy fungují dle předpokladů, tedy dokáží eliminovat nežádoucí vlivy abrazivního vodního paprsku při 2D řezání, a vytvářet tak kvalitnější výrobky. [27]

Na výsledky zmíněného výzkumu navazuje tato diplomové práce, která pracuje se stejnými typy korekčních systémů. Nově však užívá jiných druhů materiálů a do procesu řezání vstupují různé parametry nastavení stroje. Odlišný je také tvar vnitřního výřezu, nově se jedná o kruhový, nikoli obdélníkový otvor. Cílem práce je zjistit, jak budou fungovat korekční systémy na materiálech s rozdílnými vlastnostmi a chemickým složením. Zkoumána bude zhoršená kvalita ve spodní části vzorku pomocí parametru Ra, význam korekčních systému z hlediska úspory času a také možného vzniku úkosu na řezané ploše.

3.1 Materiál vzorků

Pro účely této práce byly vybrány čtyři materiály, které se vzájemně odlišují svými mechanickými a chemickými vlastnostmi. Jedná se o nerezovou ocel, titan, hliníkovou slitinu a konstrukční ocel. Jednotlivé zvolené materiály jsou popsány níže spolu s jejich chemickým složením a mechanickými vlastnostmi.

Nerezová ocel AISI 316 TI, ČSN 17 347

Austenitická korozivzdorná chromniklová ocel je legována molybdenem a stabilizována titanem. Korozivzdornost vůči kyselinám zvyšuje molybden, titan pak zvyšuje odolnost proti mezikrystalické korozi. Tvářitelnost a svařitelnost je velmi dobrá. Použití tohoto materiálu je vhodné hlavně v chemickém průmyslu.

Tab. 3.1 Chemické složení

Prvek	C max	Cr	Ni	Mo	Si max	Mn max	P max	S max	Ti
Hodnota [%]	0,08	16 -18	11 -13	2 ± 3	1	2	0,045	0,03	0,40

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti [34]

Vlastnost	Pevnost	Mez kluzu		Tažnost
	Rm [MPa]	Rp 0,2 [MPa]	Rp 0,1[MPa]	A 50 [%]
Hodnota	540-690	240	270	40

Titan Grade 2

Tento titan je nejpoužívanější při průmyslových aplikacích ve všech formách polotovarů. Je vysoce odolný proti korozi v oxidačním i lehce redukčním prostředí. Uplatňuje se v chemickém a námořním průmyslu. Dobře kombinuje pevnost a tvárnost (letecký a automobilový průmysl). Dále slouží k výrobě tepelných výměníků, chlornatých systémů, požárních systémů atd.

Tab. 3.3 Chemické složení

Prvek	O	N	C	H	Fe
Hodnota [%]	0,25	0,03	0,08	0,015	0,3

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti [35]

]Vlastnost	Pevnost v tahu	Mez kluzu	Tažnost
	Rm (MPa)	Re (MPa)	A [%]
Hodnota	485	350 – 450	28

Hliníková slitina AlMgSi, ČSN 42 4401

Hliníková slitina je materiál s dobrou tvárností, leštitelností a odolností proti korozi. Obrobitelnost řeznými nástroji je vyhovující ve vytvrzeném stavu. Používá se v leteckém a automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, potravinářství nebo pro jemnou mechaniku (např. kabiny letadel a vrtulníků, krytiny, mostové jeřáby, stožáry, rámy dveří, eskalátory).

Tab. 3.5 Chemické složení [36]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Hodnota [%]	0,30-0,70	0,05-0,40	0,10	0,10	0,40-0,90	0,10	0,20	0,05-0,20

Tab. 3.6 Mechanické vlastnosti [37]

Vlastnost	Pevnost	Mez kluzu	Tažnost
	Rm [MPa]	Rp 0,2 [MPa]	A 50 mm [%]
Hodnota	180	110	13

Konstrukční ocel S355J0

Nelegovaná konstrukční jemnozrnná ocel je vhodná ke svařování. Užívá se při svařování mostních či jiných konstrukcí, ohýbaných profilů, svařovaných konstrukcí z dutých profilů. Bývá také součástí strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol, tepelných energetických zařízení a tlakových nádob vyrobených z tyčí. [38]

Tab. 3.7 Chemické složení

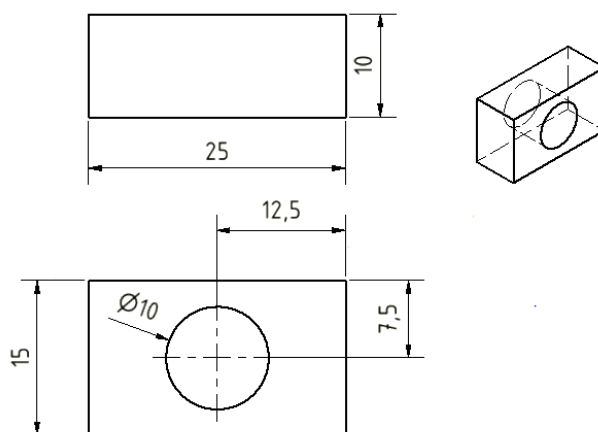
Prvek	C max	Mn	Si	P	S	N	P max
Hodnota [%]	0,23	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011	0,045

Tab. 3.8 Mechanické vlastnosti [39]

Vlastnost	Pevnost v tahu	Mez kluzu	Tažnost
	R _m (MPa)	R _{eH} (MPa)	A [%]
Hodnota	470 - 630	355	22

3.2 Zkušební vzorky

V ideálním případě by měl mít vyřezaný vzorek tvar obdélníku o rozměrech 25 x 15 mm. Tloušťka vzorků byla pro konstrukční ocel, hliníkovou slitinu a nerezovou ocel 10 mm. U titanu byl použit materiál tloušťky 11 mm. Uprostřed každého vzorku byl pak vyřezán kruhový otvor o průměru 10 mm. Přesný tvar vzorku názorně zobrazuje následující obrázek 3.1.



Obr. 3.1 Tvar vzorků pro experiment

Nastavení parametrů AWJ při řezání jednotlivých vzorků bylo vždy jiné. Rozdíl byl zajištěn změnou hmotnostního průtoku abraziva (200, 300 a 400 g·min⁻¹) a zapnutím nebo vypnutím korekčních systémů. Vzorek byl tedy vyřezán buď bez jakékoliv korekce, nebo byly zapnuty všechny korekční systémy (MFC, DRC, ProgressJet). Poslední změna nastává u kvality řezu, kdy u nerezové oceli byly takto vyřezány vzorky pro kvalitu povrchu Q5-Q2. Pro ostatní materiály (hliníkovou slitinu, konstrukční ocel, a titan) pouze ve kvalitě označené stupněm Q4.

Další parametry vstupující do procesu AWJ řezání, jako tlak vody, průměr trysky nebo průměr zaostřovací trubice, byly u všech vzorků stejné a znázorňuje je tabulka 3.9.

Tab. 3.9 Nastavení parametrů AWJ při řezání vzorků

Nastavení stroje při řezání vzorků	
Tlak vody [MPa]	350
Průměr vodní trysky [mm]	0,33
Průměr abrazivní trysky [mm]	1
Průměr zaostřovací trubice [mm]	0,89
Délka zaostřovací trubice [mm]	76
Vzdálenost od materiálu [mm]	4
Druh abraziva	Australský granát
Zrnitost abraziva [MESH]	80

Postup vyřezání vzorků se skládal z několika na sebe navazujících kroků. Nejprve byl materiál umístěn na pracovní část stroje. Následně byly do systému zadány výše uvedené parametry. Stroj umožňuje vybrat kvalitu řezu, stejně tak jako zapnutí korekčních systémů ještě před samotným začátkem řezání. V závislosti na zadání typu materiálu tedy stroj sám zvolí vhodnou rychlost řezání. Při řezání byl nejprve proveden výřez vnitřního kruhového otvoru a až poté výřez obvodové obdélníkové části.

Při řezání nerezového materiálu byly vyřezány první tři vzorky, každý s jiným průtokem abraziva (200, 300 a 400 g. min⁻¹) a se zapnutými korekčními systémy (vzorek 1, 2, 3). Další tři vzorky byly vyřezány za stejných parametrů, došlo však k vypnutí korekčních systémů (vzorek 4, 5, 6). Pro tyto vzorky platí, že byly vytvořeny pro kvalitu řezné plochy Q5. Stejný postup byl použit i u ostatních vzorků z nerezové oceli, u kterých byla postupně zadávána kvalita řezné plochy Q4 (vzorek 7-12), Q3 (vzorek 13-18) a Q2 (vzorek 19-24). Z nerezové oceli bylo tedy tímto způsobem vytvořeno celkem 24 vzorků.

Výše uvedený postup byl zachován také u ostatních materiálů (titan, hliníková slitina, konstrukční ocel) s tím, že byly vytvořeny pouze vzorky ve kvalitě řezné plochy Q4. Pro každý z těchto materiálů bylo vytvořeno pouze 6 vzorků. V experimentu bylo tedy celkově zkoumáno 42 vzorků, 24 vzorků z nerezové oceli a 18 vzorků jiných materiálů. Tyto vzorky pak byly mezi sebou navzájem porovnávány. Pro lepší představu o užitých vzorcích byl vytvořen níže uvedený obrázek 3.2.

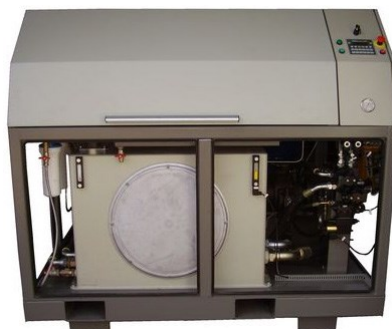


Obr. 3.2 Vzorky použité v experimentu

Vzorky byly vyřezány na Ústavu Geoniky AV ČR. Tento ústav disponuje zařízením od firmy PTV s.r.o., na kterém jsou prováděny experimenty v oblasti obrábění vodním paprskem. Stroj se skládá ze dvou hlavních částí: řezacího stolu CNC WJ2020B-1Z-D (viz obr. 3.3) a vysokotlakého čerpadla JETS (viz obr. 3.4). V tabulkách níže (tab. 3.10 a tab. 3.11) jsou uvedeny technické parametry těchto zařízení.



Obr. 3.3 Řezací stůl CNC WJ2020B-1Z-D od firmy PTV [40]



Obr. 3.4 Čerpadlo PTV – JETS [40]

Tab. 3.10 Parametry řezacího stolu: CNC WJ2020B-1Z-D [40]

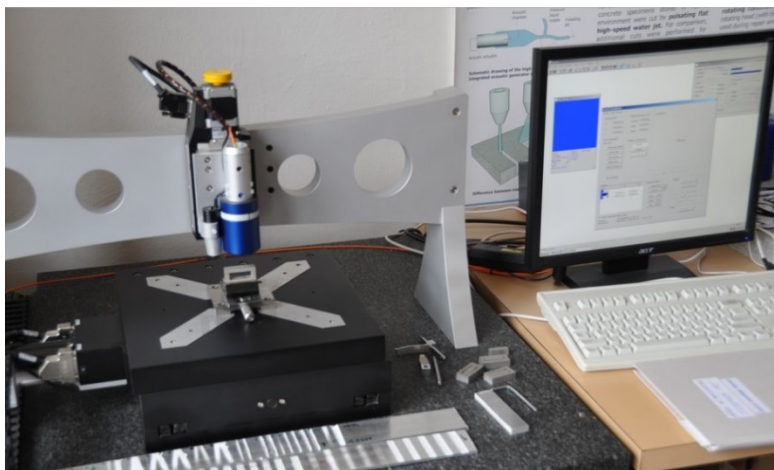
Parametry řezacího stolu: CNC WJ2020B-1Z-D	
Pracovní rozsah	
Osa x [mm]	2000
Osa y [mm]	2000
Osa z [mm]	300
Maximální posuvová rychlost [m·min ⁻¹]	75
Rozlišení nastavení os stroje x, y, z [mm]	0.001
Přesnost nastaví polohy [mm]	0.03
Rozměry stroje	
Délka [mm]	2500
Šířka [mm]	2500
Výška [mm]	2250
Hmotnost [kg]	5000

Tab. 3.11 Parametry čerpadla PTV – JETS [40]

Parametry čerpadla PTV – JETS	
Multiplikátor model H2O	2 kusy
Množství řezací vody [l·min ⁻¹]	7,5
Elektromotor	Siemens
Hydraulické čerpadlo	MOOG, dvojité
Řízení	PLC
Počet tlakových úrovní	10, přepínatelné (9 tlaků + 0)
Max. hmotnost [kg]	2 000
Max. hloubka [mm]	1 430
Max. šířka [mm]	1 890
Max. výška [mm]	1 720
Min. tlak vstupní vody [bar]	3,5
Max. tlak vstupní vody [bar]	6
Ph řezací vody	6-8
Náplň hydraulického oleje [l]	200 l
Typ hydraulického oleje	HM 46
Maximální tlak [MPa]	417

3.3 Měření nerovností řezného povrchu

Pro naměření drsnosti povrchu jednotlivých vzorků byl použit optický profilometr MicroProf FRT (viz obr. 3.5). Přístroj se nachází v prostorách Ústavu Geoniky AV ČR. Umožňuje měřit jak profil povrchu (vybrané linie), tak i 3D topografii povrchu. Přístroj je složen z nosného rámu, na kterém je umístěna měřicí hlava obsahující sensor pro měření. Tabulky 3.12 a 3.13 uvádějí parametry jednotlivých částí.



Obr. 3.5 Optický profilometr MicroProf FRT

Tab. 3.12 Měřicí hlava a senzor SEN 000 03 [40]

Charakteristika měřicí hlavy a senzoru SEN 000 03	
Spektrální rozsah osa z [mm]	3
Pracovní vzdálenost [mm]	22,5
Vertikální rozlišení [nm]	100/30
Přesnost [μm]	1
Linearity [%]	0,1
Velikost bodu paprsku [μm]	12
Laterální rozlišení [μm]	6

Tab. 3.13 Pracovní parametry profilometru MicroProf FRT [40]

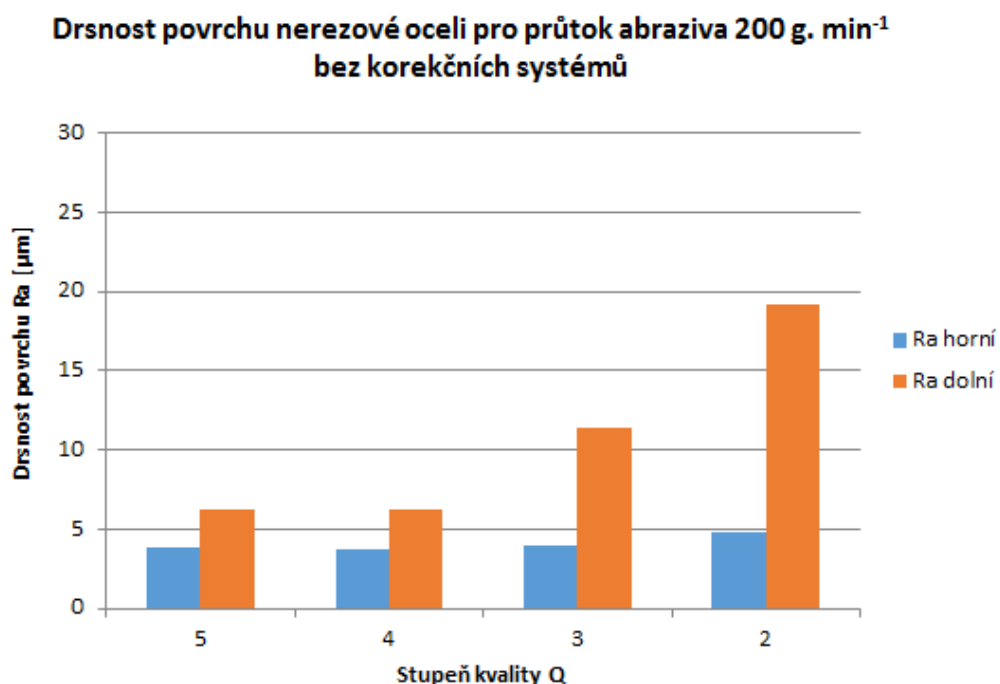
Pracovní rozsah	
Osa x [mm]	200
Osa y [mm]	200
Osa z [mm]	50
Maximální měřicí rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	100
Minimální měřicí rychlost [$\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	1
Rozlišení nastavení os měřicího přístroje x, y, z [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	0,001
Přesnost nastavení polohy [mm]	$\pm 0,001$
Minimální vzdálenost mezi měřicími body $\Delta X, \Delta Y$ [μm]	0,6
Maximální rozměr měřeného vzorku [mm^3]	310 x 310 x 50
Maximální hmotnost vzorku [kg]	5
Hmotnost přístroje [kg]	520
Doporučená pracovní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	20 ± 2
Maximální dovolená změna teploty v laboratoři [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$]	0,5

Drsnost povrchu u jednotlivých vzorků byla zkoumána pomocí parametru R_a (průměrná aritmetická úchylka profilu). Měřený vzorek byl umístěn na pracovní stůl optického profilometru MicroProf FRT, kde byla drsnost povrchu zjišťována pomocí dvou linií v horizontálním směru. První, situována 1 mm od hrany, kde vstupoval abrazivní vodní paprsek do materiálu (v práci označována jako horní) a druhá linie, 1mm od spodní části vzorku, tedy v místě, kde paprsek opouští materiál (v práci označována jako dolní). Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v grafické podobě níže.

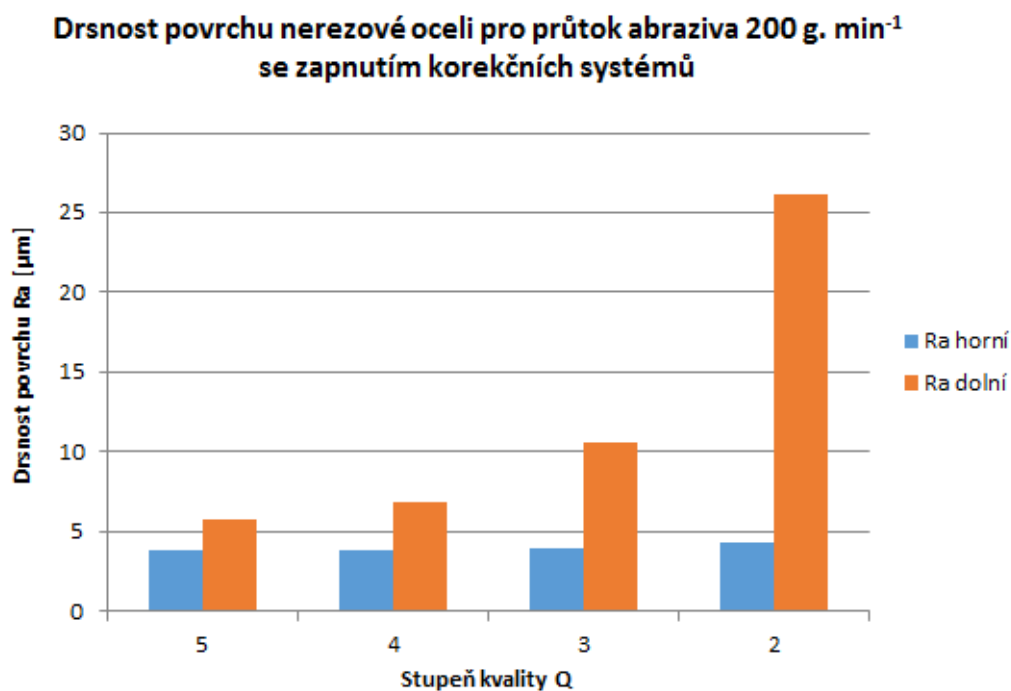
Následující grafy znázorňují drsnost povrchu R_a u nerezového materiálu jak v horní, tak v dolní oblasti. To vše pro různý stupeň kvality od nejlepší po nejhorší (Q5-Q2). První dva grafy shodně zobrazují průtok abraziva 200 g.min^{-1} . Aby byl patrný vliv korekčních systémů, byl první graf vytvořen z naměřených hodnot drsnosti u vzorků, při jejichž výrobě nebyly korekční systémy zapnuty. Následuje graf, ve kterém jsou zaznamenány hodnoty na vzorcích vytvořených při zapnutí korekčních systémů. Shodně byly vytvořeny další čtyři grafy – dva pro průtok abraziva 300 g.min^{-1} a další dva pro průtok 400 g.min^{-1} .

Drsnost povrchu byla také posuzována z hlediska jednotlivých materiálů. Z nerezové oceli byly vybrány pouze vzorky vyřezané v kvalitě řezné plochy Q4 (vzorek 7-12) a porovnávány s ostatními materiály, a to titanem, hliníkovou slitinou a konstrukční ocelí. Tyto vzorky byly rovněž vytvořeny v kvalitě řezné plochy Q4. Samotné srovnání bylo zajištěno tak, že do grafu byly vyneseny hodnoty drsnosti povrchu pro určitý průtok abraziva bez zapnutí korekčních systémů jak v horní, tak v dolní oblasti vzorku. Následující graf pak znázorňuje vzorky vyřezané za stejných parametrů, avšak se zapnutím korekčních systémů. Jedná se tedy vždy o dvojci grafů, ve kterých jsou zjišťovány změny vzniklé zapnutím korekčních systémů.

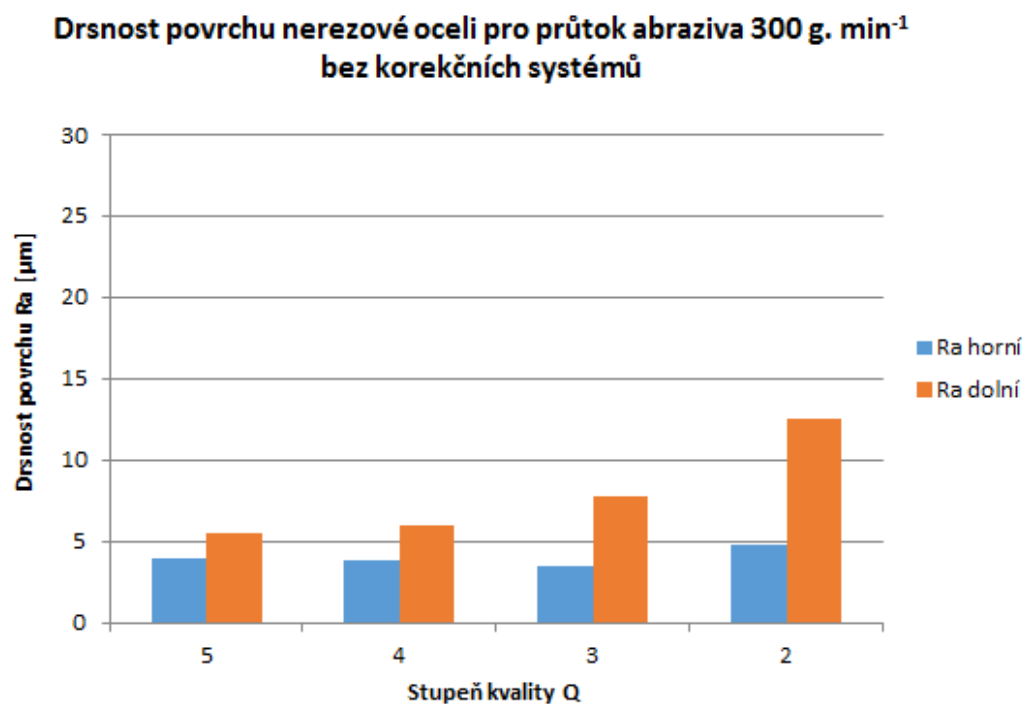
Drsnost povrchu nerezové oceli pro kvalitu řezné plochy Q5-Q2 v horní a dolní oblasti.



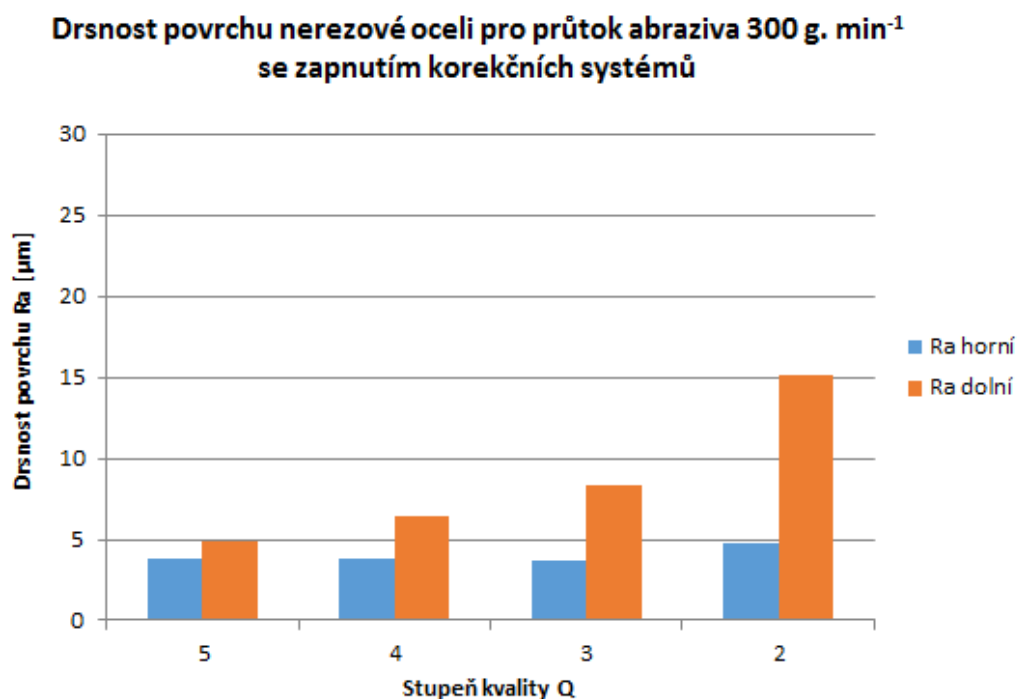
Obr. 3.6 Graf drsnosti povrchu nerezové oceli pro průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ bez zapnutí korekčních systémů



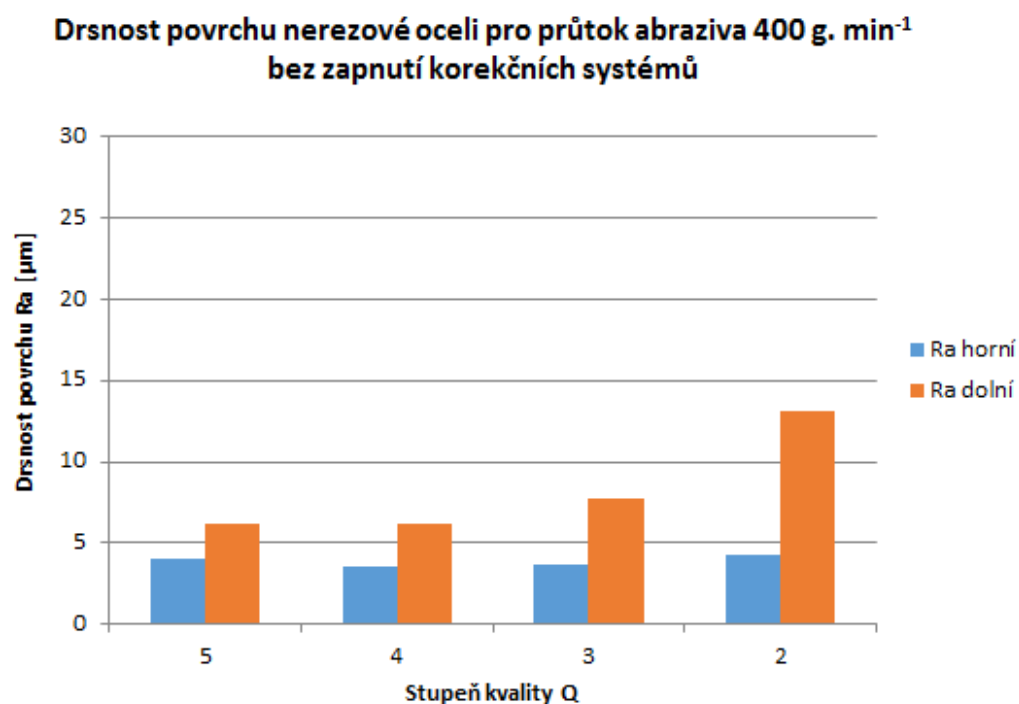
Obr. 3.7 Graf drsnosti povrchu nerezové oceli pro průtok abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ se zapnutím korekčních systémů



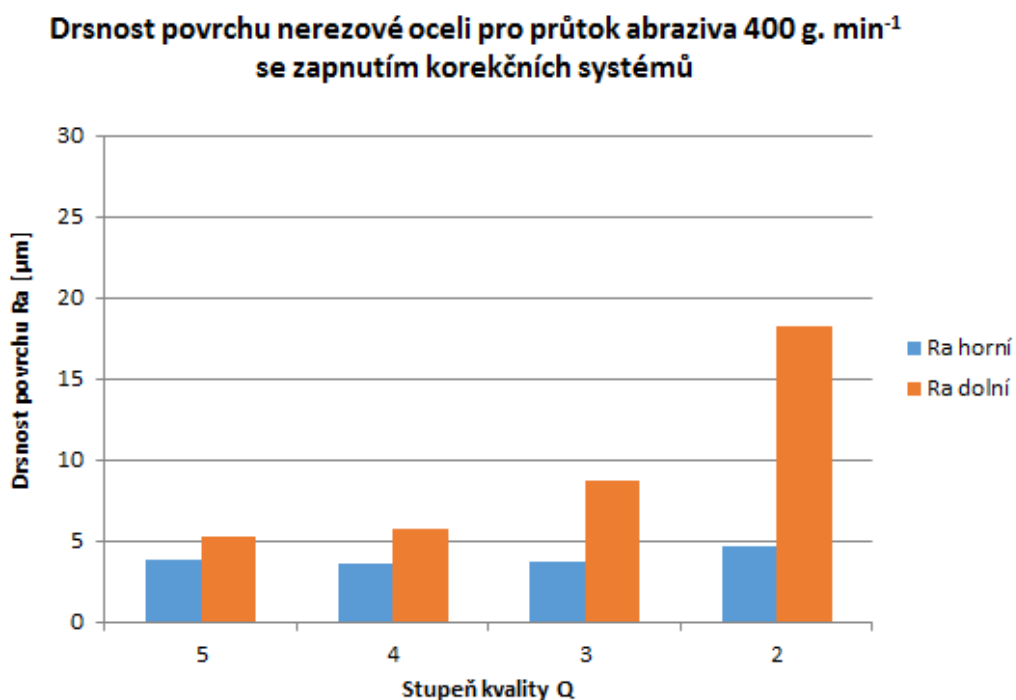
Obr. 3.8 Graf drsnosti povrchu nerezové oceli pro průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ bez zapnutí korekčních systémů



Obr. 3.9 Graf drsnosti povrchu nerezové oceli pro průtok abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ se zapnutím korekčních systémů

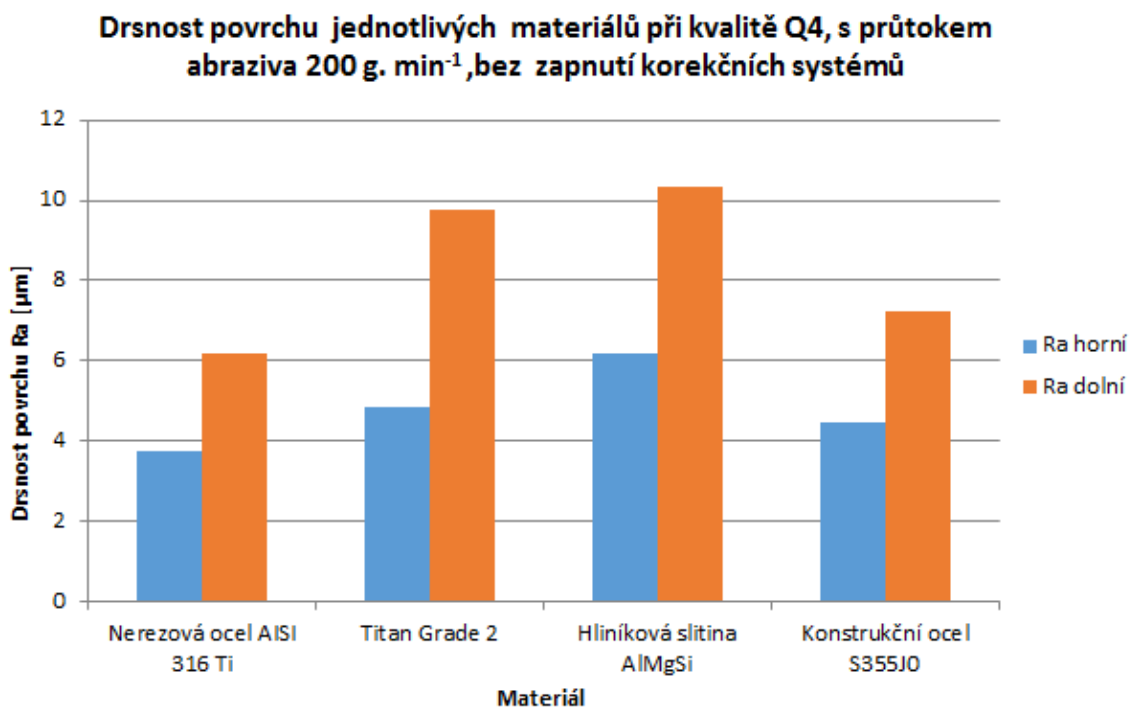


Obr. 3.10 Graf drsnosti povrchu nerezové oceli pro průtok abraziva $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ bez zapnutí korekčních systémů

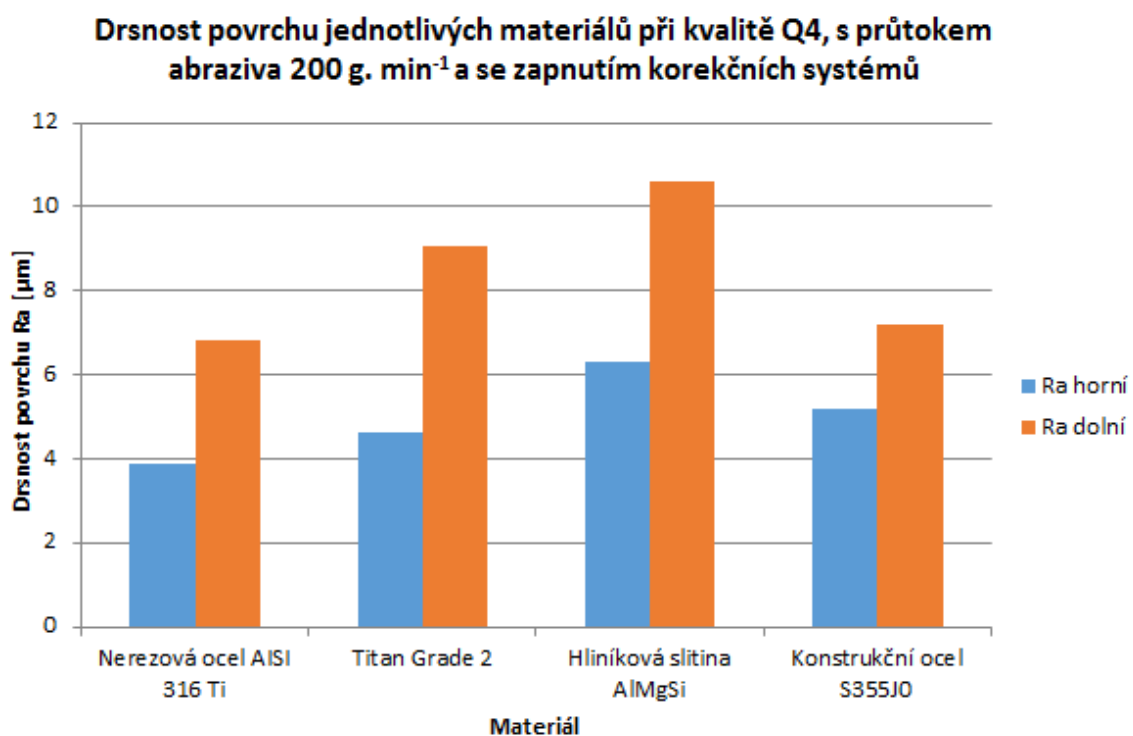


Obr. 3.11 Graf drsnosti povrchu nerezové oceli pro průtok abraziva $400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ se zapnutím korekčních systémů

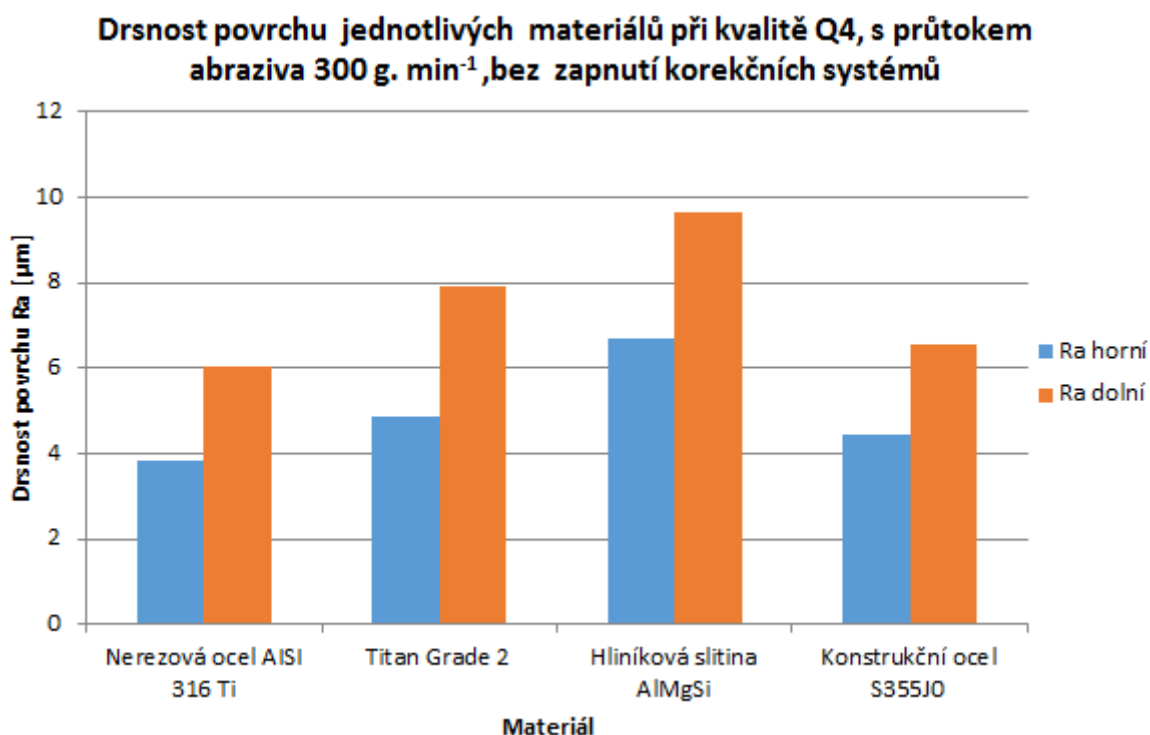
Drsnost povrchu pro jednotlivé materiály v horní a dolní oblasti



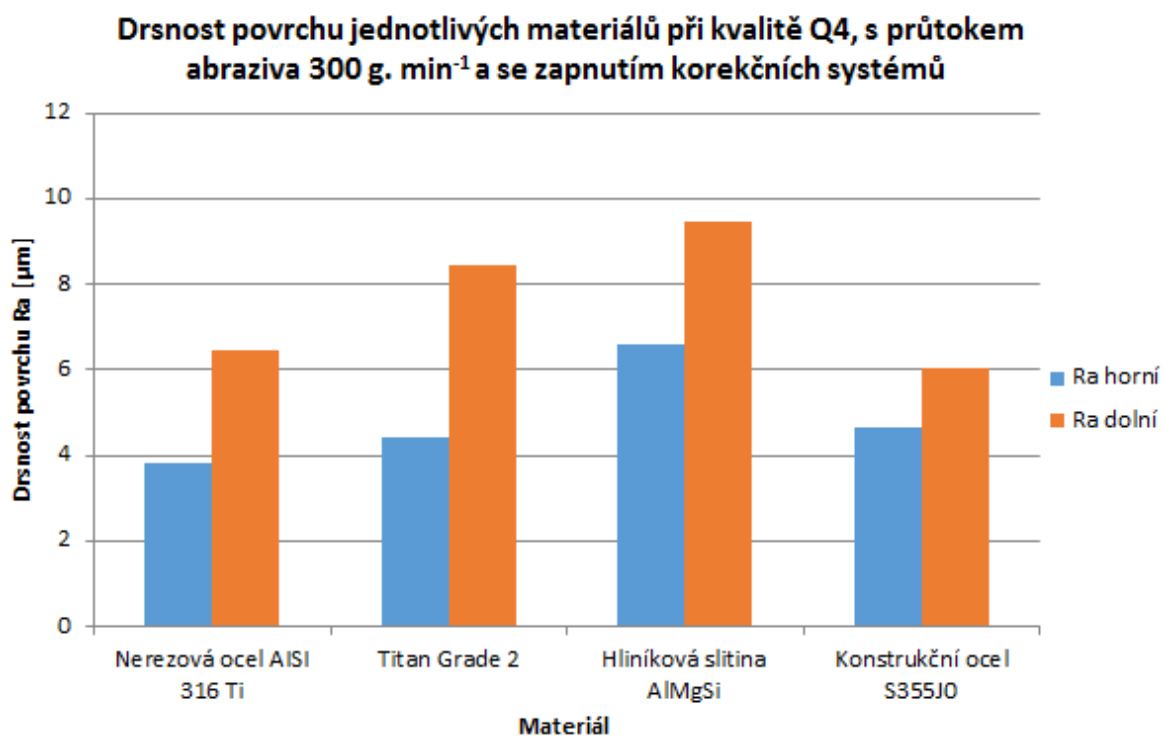
Obr. 3.12 Graf drsnosti povrchu jednotlivých materiálů při kvalitě Q4, s průtokem abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, bez zapnutí korekčních systémů



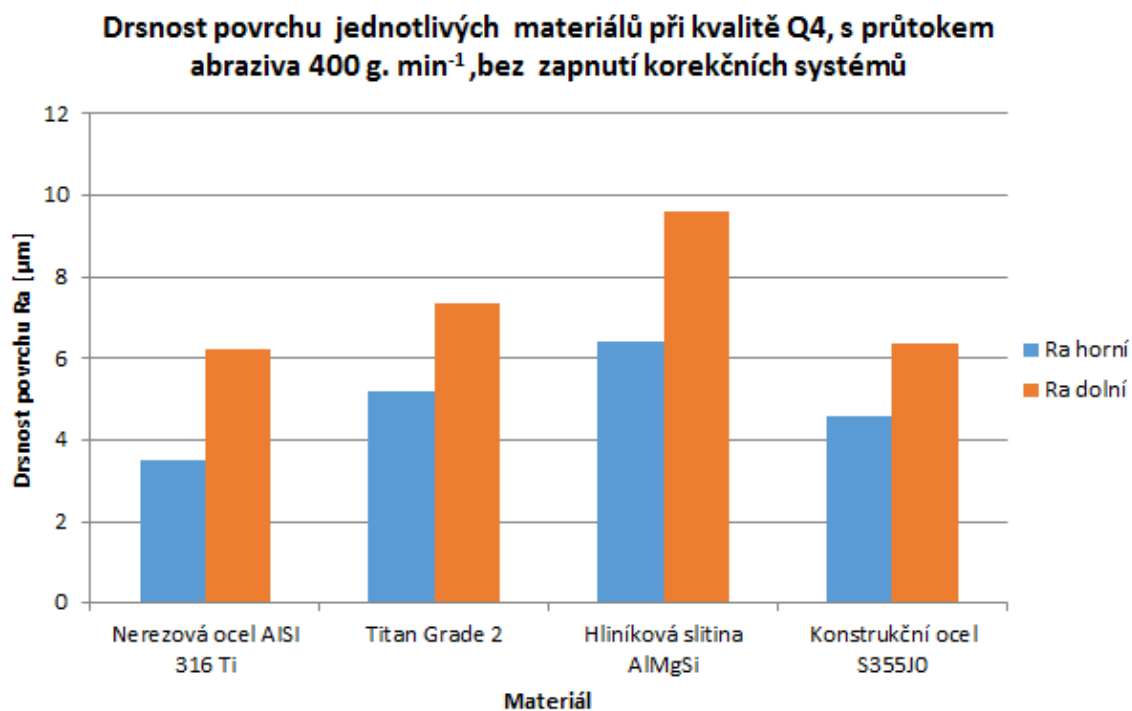
Obr. 3.13 Graf drsnosti povrchu jednotlivých materiálů při kvalitě Q4, s průtokem abraziva $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ a se zapnutím korekčních systémů



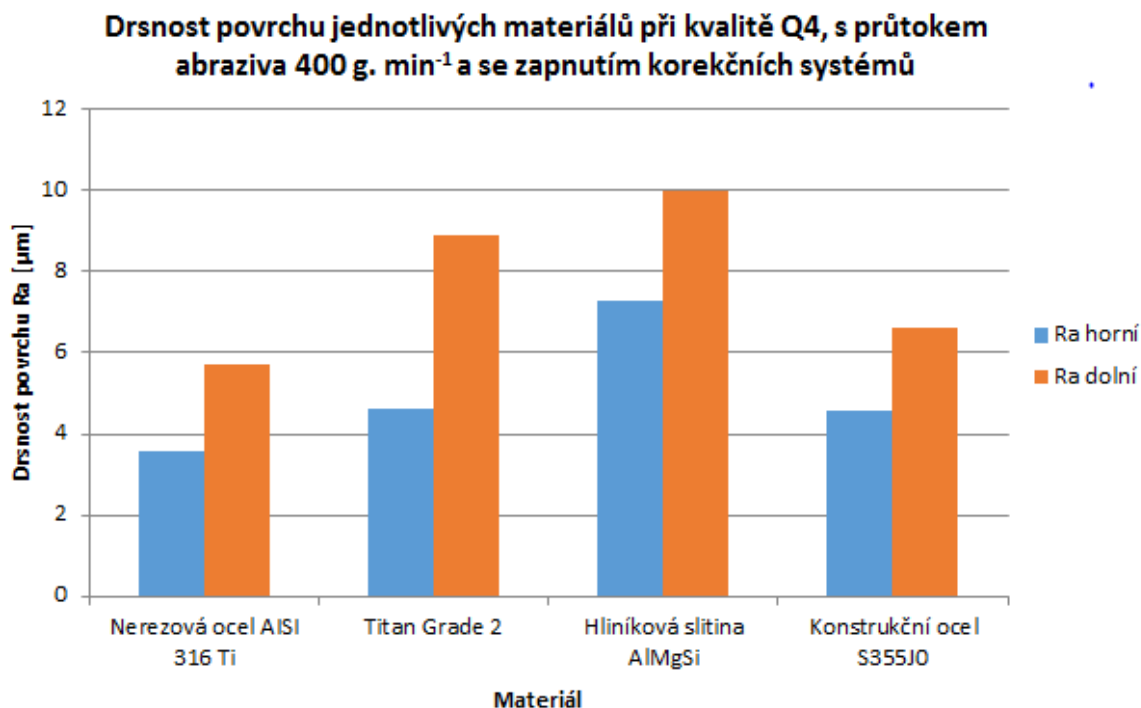
Obr. 3.14 Graf drsnosti povrchu jednotlivých materiálů při kvalitě Q4, s průtokem abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, bez zapnutí korekčních systémů



Obr. 3.15 Graf drsnosti povrchu jednotlivých materiálů při kvalitě Q4, s průtokem abraziva $300 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ a se zapnutím korekčních systémů



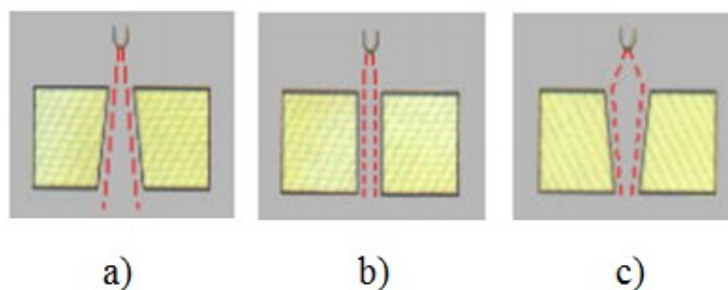
Obr. 3.16 Graf drsnosti povrchu jednotlivých materiálů při kvalitě Q4, s průtokem abraziva 400 g.min⁻¹, bez zapnutí korekčních systémů



Obr. 3.17 Graf drsnosti povrchu jednotlivých materiálů při kvalitě Q4, s průtokem abraziva 400 g.min⁻¹ a se zapnutím korekčních systémů

3.4 Měření úkosů

Při řezání abrazivním vodním paprskem vzniká ve většině případů určitý úkos (maximálně však $1,5^\circ$). Pokud je řez velmi pomalý nebo je prováděn v měkkém materiálu, paprsek stihne “probrousit” svou přirozenou kuželovou stopu (obrázek 3.18 a). Ideální varianta nastává při rovnováze mezi řeznou rychlostí, odolností a tloušťkou materiálu. Paprsek je pak schopen držet se po celou tloušťku materiálu ve válcovitém tvaru, a tak nedochází ke vzniku úkosu (obr. 3.18 b). K poslední variantě dochází při velmi rychlém řezu ve tvrdém a odolném materiálu. Paprsek není schopen “probrousit” materiál, proto se řez směrem dolů uzavírá (obr. 3.18 c). [41]



Obr 3.18 Možnosti vzniklých úkosů [41]

Měřicí zařízení

Pro zjištění rozměrové přesnosti jednotlivých vzorků na vnější rovinné ploše bylo použito digitální posuvné měřidlo značky POWERFIX s rozsahem měření do 150 mm a přesností 0,01 mm. Pro vnitřní otvor o průměru 10 mm byl zvolen mikrometr s dotyky uzpůsobenými na měření vnitřních kruhových otvorů od 5 do 30 mm s přesností 0,01 mm.

Měření rozměrů

Pro zjištění možného úkosu na materiálu po řezání abrazivním vodním paprskem bylo nutné proměřit jednotlivé vzorky. Byly měřeny jak v horní, tak v dolní části na vnější straně. Vzhledem k tomu, že zde vzorek měřil 25 mm, bylo provedeno 10 měření s intervalem mezi jednotlivými měřeními 2,5 mm. Podobně byl změřen i vnitřní otvor o průměru 10 mm na 10 místech v horní i dolní části vzorku. Měřicí zařízení zde bylo pootáčeno tak, aby měření proběhlo po celém obvodu kruhu. Ze všech naměřených hodnot byly zjištěny průměrné hodnoty, se kterými se dále počítalo u výpočtu úkosů.

Výpočet úkosu

Při výpočtu úkosu se vycházelo z vlastností pravoúhlého trojúhelníku. Jak již bylo popsáno výše, známe průměrné hodnoty rozměrů, naměřené jak v horní, tak dolní části vzorků (hodnoty a , b ve vzorci), a také jejich tloušťky (hodnota c ve vzorci). Díky tomu bylo možné pomocí funkce tangens vypočítat průměrnou hodnotu úkosu vzniklého na řezné ploše. Vzorec pro výpočet úkosů je, pro lepší přehlednost, zobrazen v následujícím nákresu (obr. 3.19).

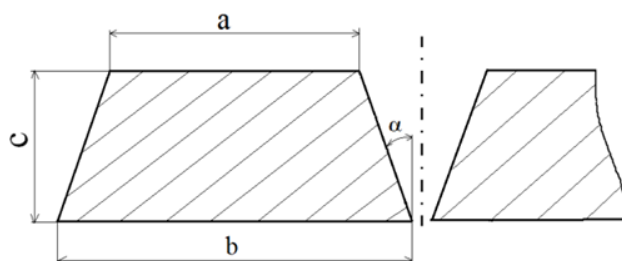
a - průměrná horní hodnota [mm]

b - průměrná spodní hodnota [mm]

c - tloušťka materiálu [mm]

α - úhel úkosu [°]

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\left| \frac{a - b}{2} \right|}{c}$$

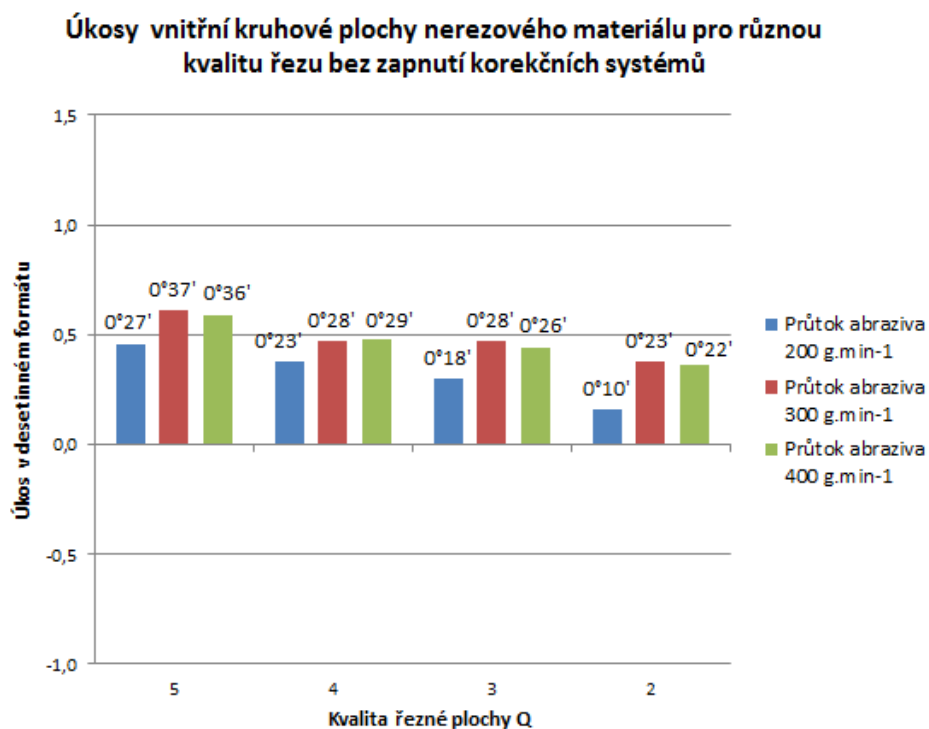


Obr 3.19 Nákres měření úkosů u jednotlivých vzorků

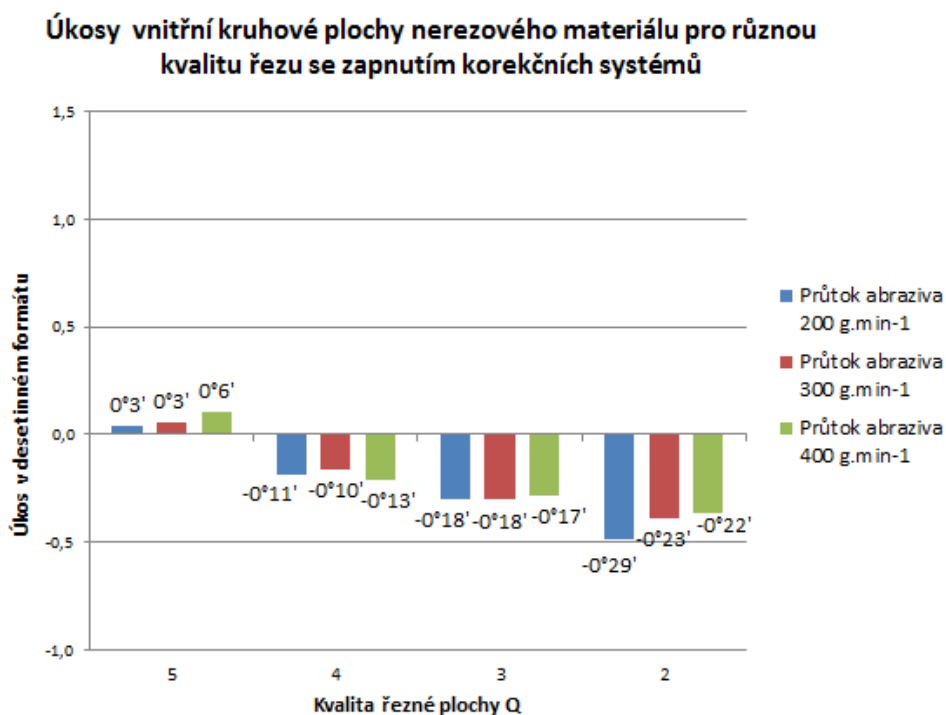
Výsledky jednotlivých výpočtů jsou znázorněny v grafické podobě níže. Porovnávány jsou nejprve úkosy naměřené na vnitřní kruhové ploše, poté na vnější rovinné ploše. U nerezové oceli je znázorněn úkos u vzorků vytvořených v rozdílných kvalitách řezné plochy, také je zobrazen vliv průtoku abraziva na úkos při procesu řezání. Patrný je vliv jednotlivých materiálů na úkos při zachování parametrů AWJ řezání. Aby byl zjevný účinek korekčních systémů na úkos, je důležité nahlížet vždy na dvojici grafů, kdy u prvního grafu jsou znázorněny úkosy u vzorků vyřezané bez zapnutí korekcí, kdežto u dalšího jsou použity úkosy vzorků vyřezané s pomocí korekčních systémů.

V grafech jsou uvedeny hodnoty označené záporným i kladným znaménkem, aby bylo patrné, zda byl úkos vytvořen rozšiřujícím se paprskem nebo takovým, který se směrem dolů uzavírá. Pro vnitřní kruhový otvor i vnější rovinnou plochu je znázorněn záporný úkos tehdy, když se paprsek směrem dolů zvětšoval.

Úkosy vnitřní kruhové plochy nerezového materiálu pro různou kvalitu řezné plochy.

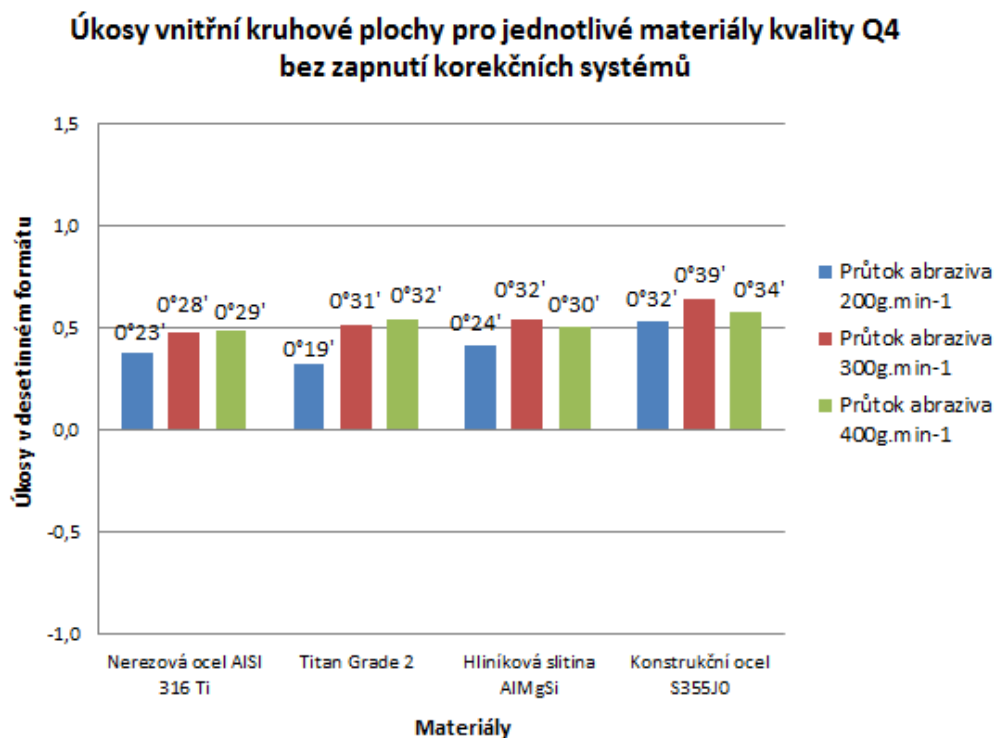


Obr. 3.20 Graf znázorňující úkosy vnitřní kruhové plochy nerezového materiálu pro různou kvalitu řezu bez zapnutí korekčních systémů

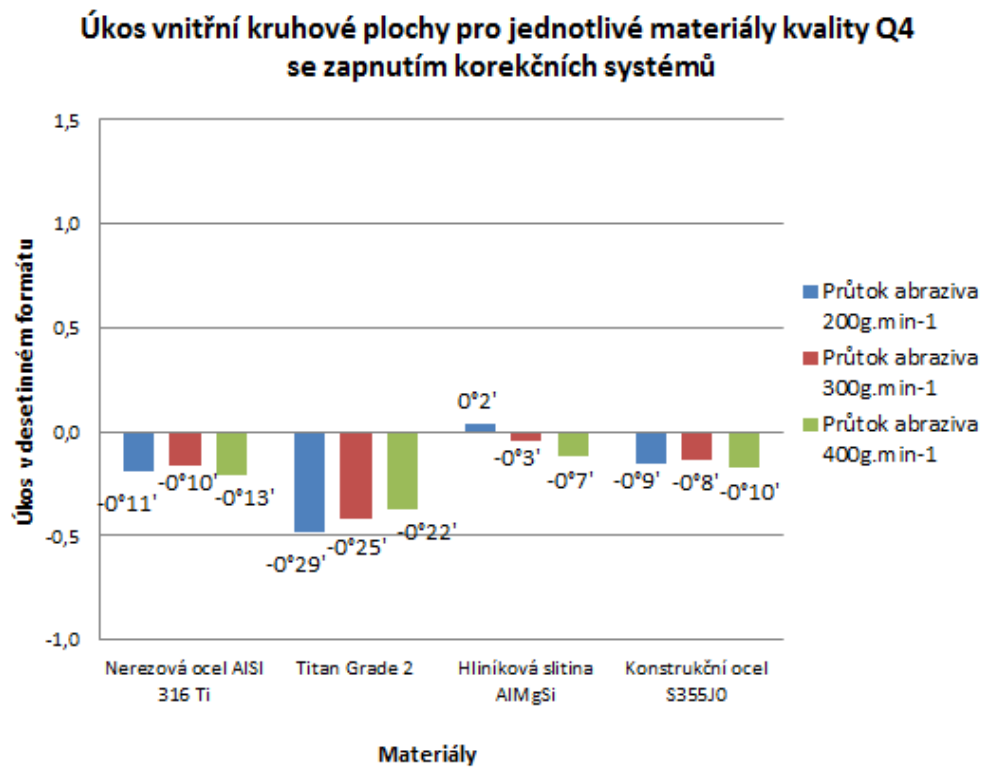


Obr. 3.21 Graf znázorňující úkosy vnitřní kruhové plochy nerezového materiálu pro různou kvalitu řezu se zapnutím korekčních systémů

Úkosy vnitřní kruhové plochy jednotlivých materiálů kvality Q4

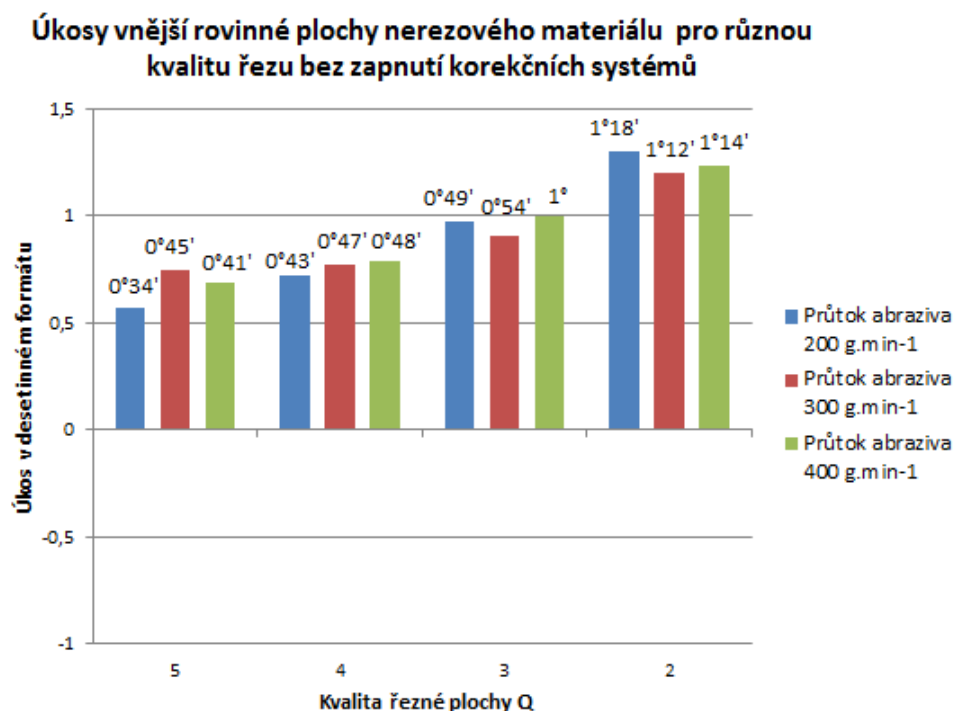


Obr. 3.22 Graf znázorňující úkosy vnitřní kruhové plochy pro jednotlivé materiály kvality Q4 bez zapnutí korekčních systémů

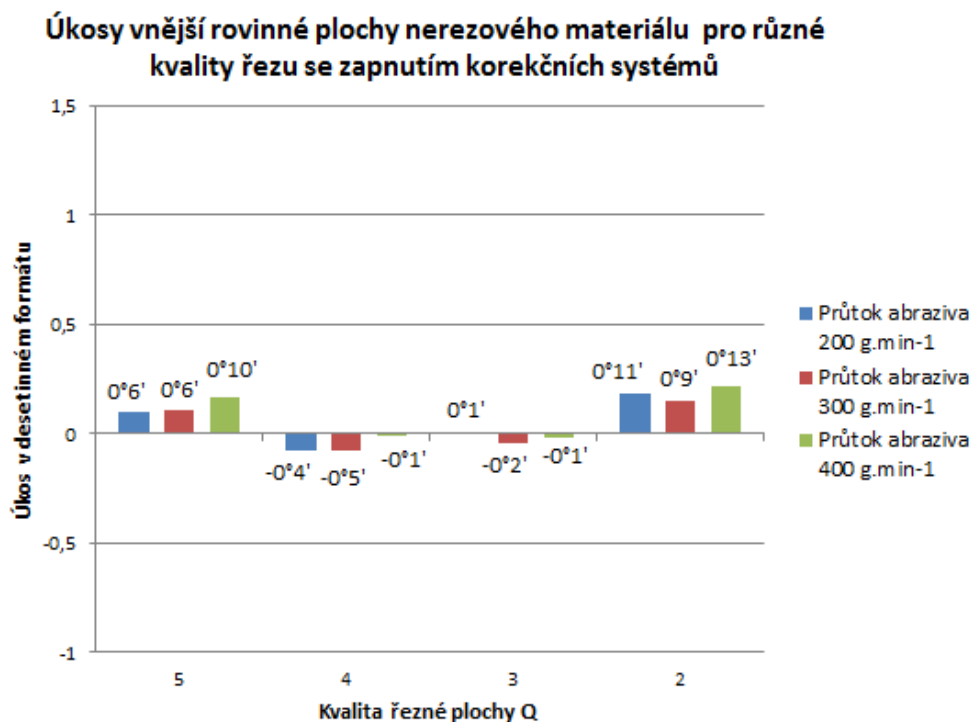


Obr. 3.23 Graf znázorňující úkosy vnitřní kruhové plochy pro jednotlivé materiály kvality Q4 se zapnutím korekčních systémů

Úkosy vnější rovinné plochy nerezového materiálu pro různou kvalitu řezné plochy.

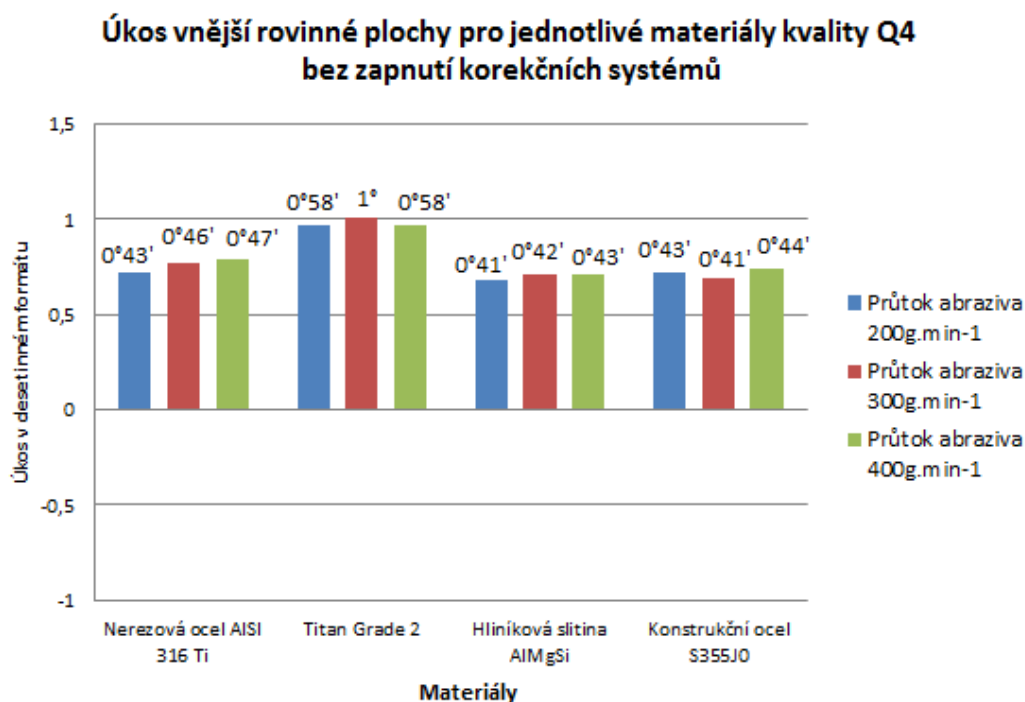


Obr. 3.24 Graf znázorňující úkosy vnější rovinné plochy nerezového materiálu pro různou kvalitu řezu bez zapnutí korekčních systémů

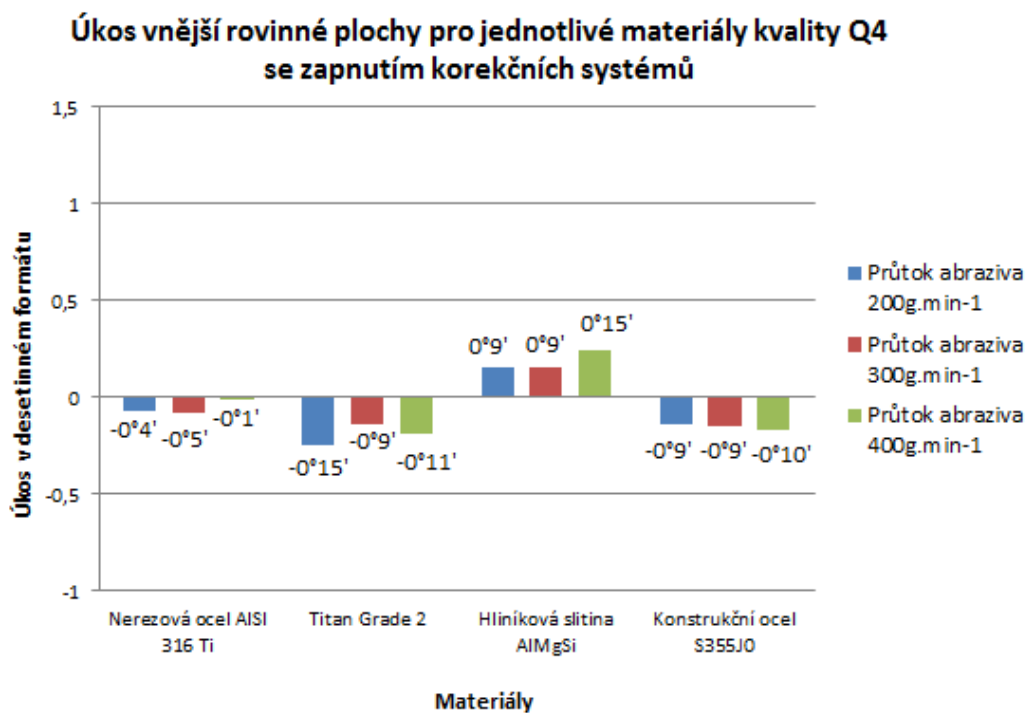


Obr. 3.25 Graf znázorňující úkosy vnější rovinné plochy nerezového materiálu pro různou kvalitu řezu se zapnutím korekčních systémů

Úkosy vnější rovinné plochy jednotlivých materiálů kvality Q4



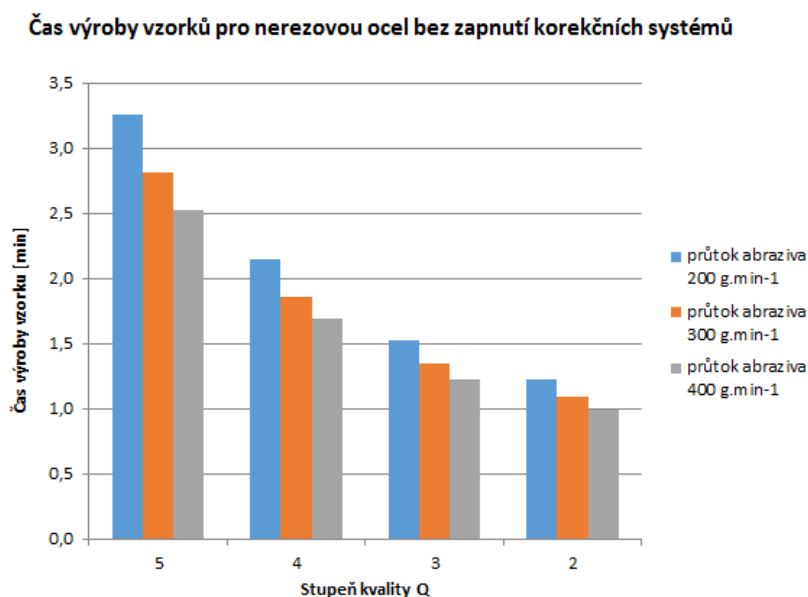
Obr. 3.26 Graf znázorňující úkosy vnější rovinné plochy pro jednotlivé materiály kvality Q4 bez zapnutí korekčních systémů



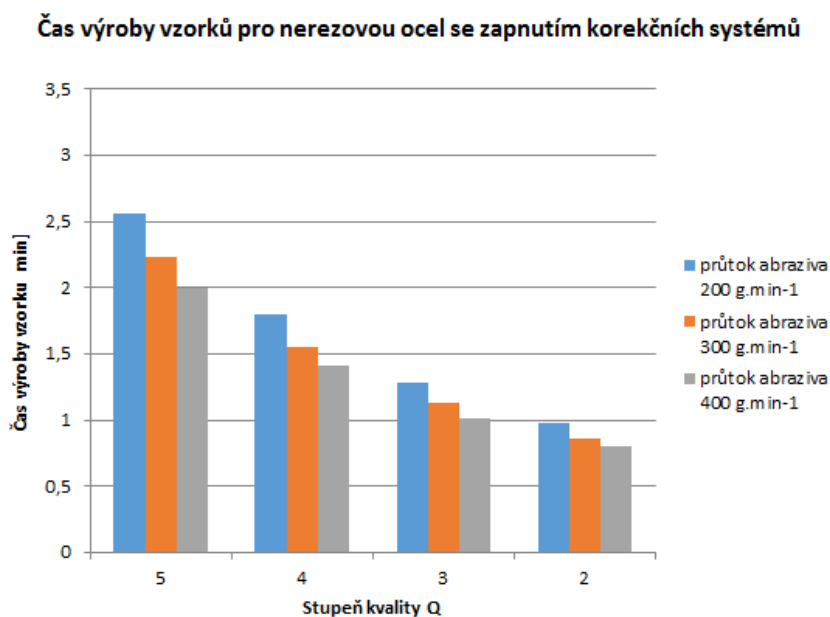
Obr. 3.27 Graf znázorňující úkosy vnější rovinné plochy pro jednotlivé materiály kvality Q4 se zapnutím korekčních systémů

3.5 Čas výroby vzorků

Korekční systémy mají kromě zachování stanoveného stupně kvality řezné plochy a eliminace některých průvodních jevů abrazivního vodního řezání také výrazněji zkrátit čas výroby. Následující grafy znázorňují čas potřebný k vyřezání vzorků z nerezového materiálu pro různou kvalitu řezné plochy a pro různé průtoky abraziva, a to jak bez korekčního systému, tak také s korekčními systémy.



Obr. 3.28 Graf znázorňující čas výroby vzorků pro nerezovou ocel bez zapnutí korekčních systémů



Obr. 3.29 Graf znázorňující čas výroby vzorků pro nerezovou ocel se zapnutím korekčních systémů

3.6 Rozbor výsledků

Pro řezání abrazivním vodním paprskem je typické, že v důsledku ztráty energie dochází ke zhoršení kvality řezné plochy v dolní oblasti obrobku. [42] Tento jev je viditelný i v grafech znázorňujících drsnost povrchu nerezové oceli při kvalitě řezné plochy Q5-Q2 (viz obr. 3.6 – obr. 3.11).

Pokud porovnáme drsnost povrchu v závislosti na použití nebo vynechání korekčních systémů u jednotlivých vzorků z nerezové oceli, pak můžeme říci, že se v horní oblasti použití korekčních systémů příliš neprojevovalo. Změny se u vzorků pohybovaly v rozmezí do 1 μm . K viditelnější změně došlo při porovnání drsnosti v dolní oblasti pouze u kvality Q2. U těchto vzorků byla při použití korekčních systémů drsnost zvýšena, a to při všech průtocích abraziva. U průtoku 200 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ došlo ke zvýšení drsnosti v dolní části o 7 μm (obr. 3.6 a obr. 3.7), u průtoku 300 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ činilo zvýšení 2,6 μm (obr. 3.8 a obr. 3.9) a v posledním případě 400 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ pak byla drsnost vyšší o přibližně 5 μm (obr. 3.10 a obr. 3.11). Výrobce však doporučuje použití korekčních systémů pouze u vyšších kvalitativních stupňů (Q5 a Q4). Pokud porovnáme jednotlivé stupně kvality Q5-Q2 v rámci jednotlivých průtoků, ať už s korekcí nebo bez ní, dochází k situaci, kdy snížený stupeň kvality znamená zvýšenou úroveň drsnosti. Jinými slovy, se snižujícím se stupněm kvality se zvyšuje také velikost parametru drsnosti Ra.

Drsnost povrchu u vzorků z titanu, hliníkové slitiny i konstrukční oceli je, stejně jako u nerezového materiálu, v dolní části vyšší (viz obr. 3.12 až obr. 3.17). Nejvyšší hodnoty drsnosti řezné plochy byly zjištěny u hliníkové slitiny pro různé průtoky abraziva, a to jak v horní, tak v dolní oblasti obrobku. Totéž platí také u vzorků, při jejichž výrobě byly zapnuty korekční systémy.

Při posouzení vlivu korekčních systémů na drsnost povrchu u jednotlivých materiálů nebyla zjištěna vzájemná závislost. Bylo proto potřebné nahlížet na materiály samostatně. U vzorků vyřezaných z titanu se ukázalo, že korekční systémy fungují nejlépe při průtoku abraziva 200 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ (obr. 3.12 a obr. 3.13). V tomto případě došlo k poklesu drsnosti jak v horní, tak v dolní části obrobku. Podobná situace nastala také u vzorků vyřezaných z hliníkové slitiny při průtoku abraziva 300 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ (obr. 3.14 a obr. 3.15). Ve všech ostatních případech, a to včetně vzorků z konstrukční oceli, došlo vlivem korekčních systémů k určitému zvýšení drsnosti ploch, které ovšem nadále vyhovují danému kvalitativnímu stupni.

Dalším ukazatelem kvality řezné plochy byly úkosy vzorků. Nejprve byla pozornost věnována vnitřní kruhové ploše. Při zkoumání úkosu nerezového materiálu je patrné, že u vzorků vyřezaných bez korekčních systémů (viz obr. 3.20) došlo ke vzniku kladného úkosu (obr. 3.18 c). Také lze vypořádat závislost velikostí úkosu a požadovaného stupně kvality řezu. S nižším stupněm kvality řezné plochy se naměřené hodnoty úkosu snižují. Význam hmotnostního průtoku abraziva je také zřejmý. Při použití průtoku abraziva 300 a 400 g.min⁻¹ jsou hodnoty úkosu vnitřní plochy téměř shodné (maximálně rozdíl 0° 2'). U řezání vzorků s průtokem abraziva 200 g.min⁻¹ je úkos nižší. Vliv korekčních systémů na tento materiál při použití stejných parametrů lze vidět na obrázku 3.21. Z grafu je patrné, že korekční systém nejlépe funguje při kvalitě řezné plochy Q5. V tomto případě se objevuje pouze mírný kladný úkos nepřesahující hodnotu 0° 6'. U řezných ploch o kvalitě Q4 – Q2, vytvořených za pomoci korekčních systémů, byl zjištěn výraznější záporný úkos. V těchto případech korekční systém způsobil zvětšení kruhového otvoru směrem k dolní hraně (obr 3.18 c).

Úkos vnitřního kruhového otvoru u zbývajících materiálů (titan, hliníková slitina, konstrukční ocel) s kvalitou řezné plochy Q4 (obr. 3.22), vyřezaného bez korekčních systémů, byl také kladný. Také v těchto případech se ukázal hmotnostní průtok abraziva 200g.min⁻¹ jako nejvhodnější. Po zapnutí korekčních systémů u nerezové a konstrukční oceli byl úkos zmenšen. Došlo zde také ke změně kladného úkosu na záporný, a tedy k situaci, kdy se kruhový otvor směrem dolů zvětšil. Podobně na tom byl i titan, u kterého došlo k velmi malému odstranění úkosu. V případě průtoku abraziva 200g.min⁻¹ i k zvětšení úkosu. Naopak nejlépe se korekční systémy při kvalitě řezu Q4 osvědčily u slitiny hliníku.

Stejně jako vnitřní kruhová plocha byla posuzována i vnější rovinná plocha. Nejprve byla zkoumána nerezová ocel v různých kvalitách řezné plochy, a to jak bez korekce, tak s korekcí. Následně byla pozornost věnována ostatním materiálům. Úkos vnější rovinné plochy nerezového materiálu bez zapnutí korekčních systémů se pohyboval v kladných hodnotách. Při snižování stupně kvality se hodnota úkosu zvýšila. Výraznější vliv hmotnostního průtoku abraziva nebyl zjištěn. Při porovnání vzorků vyřezaných bez korekčních systémů a s jejich zapnutím můžeme říct, že korekční systémy při řezání rovinných ploch fungují velmi dobře. U všech vzorků vytvořených s rozdílnou kvalitou řezu se velmi výrazně snížila naměřená hodnota úkosu. U vzorků s kvalitou řezné plochy Q2 je úkos snížen o více než 1°.

Dále byl zkoumán úkos vnější rovinné plochy jednotlivých materiálů vyřezaných ve shodné kvalitě Q4. Vzorky v této kvalitě, vyřezané bez korekčních systémů, a to jak z nerezové oceli, tak z titanu, hliníkové slitiny a konstrukční oceli, vytvořily vždy kladný úkos. Úkos se pohyboval od $0^{\circ} 41'$ do $0^{\circ} 47'$, pouze u titanu došlo k zúžení drážky v dolní části až o 1° (obr. 3.26). Použití korekčních systémů u těchto vzorků se ukázalo jako vyhovující. U všech zkoumaných materiálů došlo k výrazné redukci úkosu. Největší zjištěná hodnota úkosu nepřesahovala $0^{\circ} 15'$ (viz obr. 3.27). Je nutné zmínit, že u tří ze zkoumaných materiálů (nerezová ocel, titan, hliníková slitina) se po použití korekčního systému vytvořil úkos záporný, tedy vnější rozměr se směrem dolů mírně zmenšil. Výsledky ukázaly, že z hlediska možného vzniku úkosu je použití korekčních systémů vhodné především při vyšší požadované kvalitě řezné plochy (kvality Q5 a Q4), což ostatně výrobce doporučuje.

Jak bylo řečeno v teoretické části práce, kvalitu řezné plochy lze ovlivnit mimo jiné také rychlostí řezání. Vhodným nastavením parametrů lze docílit snížení času výroby, avšak se zhoršením kvality řezné plochy. U grafů znázorňujících čas výroby vzorků z nerezového materiálu (viz obr. 3.28 a 3.29) je zjevný vliv stupně požadované kvality na dobu potřebnou pro vytvoření obrobku. Výroba vzorků s nejvyšší kvalitou Q5 byla časově nejnáročnější. Patrná byla také závislost množství hmotnostního průtoku abraziva na výsledný čas výroby. Při použití většího množství abraziva se zvýšila průměrná řezná rychlost, což způsobilo zkrácení celkového času výroby vzorků. Použití korekčních systémů výrazně zkrátilo čas výroby, zejména při vyšší kvalitě řezu. U vzorků s kvalitou řezné plochy Q5 při průtoku $200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ se celý proces řezání zkrátil o přibližně 42 sekund z celkového času 3 minuty 16 sekund. U vzorků kvality Q2 se stejným průtokem abraziva došlo ke zkrácení výrobního času o 15 sekund. V tomto případě celkový čas výroby bez korekčních systémů trval 1 minutu 14 sekund.

Závěr

Předkládaná diplomová práce s názvem *Technické možnosti ovlivnění tvarových a rozměrových charakteristik obrobku při řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem na X-Y řezacím stole* se zabývala technologií řezání vysokorychlostním vodním paprskem se zaměřením na abrazivní vodní paprsek. Tato technika obrábění se řadí k nekonvenčním metodám obrábění, proto jim byl v práci také věnován prostor. Jednotlivé nekonvenční metody byly popsány v úvodu práce. Především byl vysvětlen jejich princip a použití pro řezání různých materiálů. Další části byly věnovány výhradně technologii vysokorychlostního vodního paprsku. Byla zmíněna její historie, dále byly popsány dvě základní metody obrábění vodním paprskem (čistý vodní paprsek a abrazivní vodní paprsek), jednotlivé části stroje a typy používaných paprsků.

Cílem práce bylo zjistit funkci korekčních systémů naklápění řezné hlavy na čtyřech materiálech s odlišnými chemickými a mechanickými vlastnostmi. Jednalo se o nerezovou ocel AISI 316 Ti, titan Grade 2, hliníkovou slitinu AlMgSi a konstrukční ocel S355JO. Zkoumán byl vliv korekčních systémů na drsnost povrchu pro rozdílný stupeň kvality, i na možný vznik úkosu. Posledním zkoumaným parametrem byla doba výřezu vzorku s korekcí a bez korekce.

Diplomová práce navazovala na bakalářskou práci s názvem *Vliv moderních korekčních systémů naklápění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem*, ve které byly posuzovány korekční systémy jednotlivě. V předkládané práci byly všechny vzorky vyřezány buď bez jakékoliv korekce, nebo se zapnutím všech korekčních systémů. Bakalářská práce byla rozšířena o další typy materiálů, závislost hmotnostního průtoku abraziv, kvalitu řezné plochy a čas výroby vzorků. Změna nastala také u tvaru vzorků, kdy nově byl zkoumán vliv korekcí při řezu kruhové plochy.

Při hodnocení drsnosti povrchu všech zkoumaných materiálů bylo zjištěno, že korekční systémy je vhodné použít zejména při nastavení vysoké požadované kvality řezu (Q5 a Q4). Při nižší kvalitě řezné plochy (Q3 a Q2) docházelo k výraznému zvýšení drsnosti převážně v dolní části vzorku. Při zhodnocení úkosů na vnější rovinné ploše bylo zjištěno, že zde korekční systémy fungují velmi dobře a dochází k výrazné redukci úkosů u všech materiálů. U vnitřních kruhových ploch nebyl úkos snížen vždy, zásadní vliv měl typ materiálu. Ze zjištěných výsledků je zřejmé, že při požadavku na vytvoření nižší kvality řezné plochy bylo možné zvýšit řeznou rychlost, a tím i zkrátit dobu řezání.

Na celkový čas výroby vzorků měl vliv také hmotnostní průtok abraziva. Ukázalo se, že větší průtok abraziva umožnil zkrátit dobu řezání. Korekční systémy pak zkrátily celkovou dobu řezání u všech posuzovaných vzorků. Největší úspora času nastala při řezání vzorků s nejlepší kvalitou řezné plochy.

Z výsledků práce vyplynulo, že při zapnutí korekčních systémů a vhodném nastavení parametrů lze docílit vyšší produktivity a zlepšení kvality řezné plochy.

Seznam použité literatury

- [1] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [2] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] PÍŠKA, Miroslav at al. *Speciální technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [5] JANÁČ, Alexandr; BÁTORA, Bohumil; BARÁNEK, Jan at al. *Technológia Obrábania*. Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2004. 288 s. ISBN 80-227-2031-3.
- [6] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [7] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 3. část*. [online]. Brno : VUT v Brně, FSI, Ústav strojírenské technologie, 2005 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [8] KALENDA, Jan. *Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s., příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička. Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16773>
- [9] BENKO, Bernard; FODREK, Peter; KOSEČEK, Miroslav at al. *Laserové technológie*. Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2000. 122 s. ISBN: 80-227-1425-9.

- [10] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice : Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [11] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrabania*. Žilina : Žilinská univerzita, 2001. 167 s. ISBN 80-2100-853-2
- [12] ELUC [online]. [cit. 2016-02-22]. Obrábění iontovým paprskem. Dostupné z WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1422>>
- [13] ELUC [online]. [cit. 2016-02-20]. Plazmové technologie. Dostupné z WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1419>>
- [14] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava; LANGER, Ivo. *Nekonvenční technologie*. Havlíčkův Brod : FRAGMENT, 1998. 164 s. ISBN 80-720-0296-1.
- [15] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Říjen 2007 [cit. 23. února 2016]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>
- [16] SUMMERS, D.A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [17] WILKINS, Christopher. Waterjet Cutting: The Other “Non-Traditional” Process. *Omax* [online]. s. 11-16 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <www1.omax.com/images/files/WATERJETCUTTING.pdf>.
- [18] FLOW [online]. [cit. 2016-02-19]. Our history. Dostupné z WWW: <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>>.
- [19] KRAJNÝ, Zdenko. *Vysokotlaký vodný lúč*. Bratislava : Nakladatelství STU, 2011. 160 s. ISBN 978-80-227-3535-3
- [20] VAŠEK, J.; FIALOVÁ, V.; FOLDYLA, J. Mechanismus rozpojování hornin vysokotlakým vodním médiem. *Výroční zpráva*, HOÚ ČSAV Ostrava, 1986.
- [21] SITEK, L. Osobní sdělení, 13.4.2016.

- [22] BYSTRONIC [online]. [cit. 2016-02-20]. Water jet cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.bystronic.com/en/Products/waterjet-systems/>>
- [23] WCM [online]. [cit. 2016-03-19]. Princip řezání. Dostupné z WWW: <<http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>>.
- [24] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava : Miroslav Mračko, 1998. 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [25] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. Prešov : Fakulta výrobných technológií TU, 2008. 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [26] FOLDYNA, Josef. Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti? *Vesmír* [online]. Prosinec 2013 [cit. 2016-02-23]. Dostupné na WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti>>.
- [27] Ormaniec, J. *Vliv moderních korekčních systémů naklápění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem: Bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 54 s. Vedoucí práce: Sitek, L.
- [28] CHPS [online]. [cit. 2014-03-13]. Vodní paprsek. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena>>.
- [29] MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2016-04-19]. Stroje pro nekonvenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/6.3.pdf>.
- [30] PTV. Hostivice. Manuál ovládání řídicího systému pro operátora (základní část – od vygenerování programu do procesu řezání).

- [31] BENEŠOVÁ Dana. Soustružení abrazivním kapalinovým paprskem zvyšuje trvanlivost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Únor 2014 [cit. 23. dubna 2016]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/soustruzeni-abrazivnim-kapalinovym-paprskem-zvysuje-trvanlivost.html>>.
- [32] DVOŘÁKOVÁ, Jana; DVOŘÁK, Jaromír. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Duben 2007 [cit. 15. března 2016]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>>.
- [33] PTV [online]. [cit. 2016-03-11]. Speciální technologie. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/specialni-technologie/>>.
- [34] ALU KÖNIG FRANKSTAHL s r. o. [online]. [cit. 2016-04-22]. Charakteristika nerezových ocelí. Dostupné z WWW: <<http://www.akfs.cz/akfs/index.php?menu=234>>.
- [35] INKOSAS [online]. [cit. 2016-04-22]. Titan Grade 2. Dostupné z WWW: <<http://www.inkosas.cz/download/titanove-slitiny-grade/titan-grade-2.pdf>>.
- [36] PROAL [online]. [cit. 2016-04-22]. Informace. Dostupné z WWW: <<http://www.proal.cz/info/424401.htm>>.
- [37] ALUPLUS [online]. [cit. 2016-04-22]. Katalog. Dostupné z WWW: <<http://www.aluplus.cz/Katalog.pdf>>.
- [38] FERONA [online]. [cit. 2016-04-22]. E- ŽELEZNÁ KNIHA. Dostupné z WWW: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php>.
- [39] BOLZANO [online]. [cit. 2016-04-22]. Přehled vlastností oceli S355JO. Dostupné z WWW: <<http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355jo>>.

- [40] ZELENÁK, Michal. *Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace*. Disertační práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta Hornicko-geologická. 110s.
- [41] Vodní paprsek [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>
- [42] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.

Seznam příloh

Příloha A	Naměřené hodnoty u vzorků z nerezové oceli AISI 316 Ti
Příloha B	Naměřené hodnoty u vzorků z titanu Grade 2
Příloha C	Naměřené hodnoty u vzorků z hliníkové slitiny AlMgSi
Příloha D	Naměřené hodnoty u vzorků z konstrukční oceli S355J0
Příloha E	Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy u vzorků z nerezové oceli AISI 316 Ti
Příloha F	Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy u vzorků z titanu Grade 2
Příloha G	Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy u vzorků z hliníkové slitiny AlMgSi
Příloha H	Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy vzorků z konstrukční oceli S355J0
Příloha I	Výpočet úkosu vnější rovinné plochy u vzorků z nerezové oceli AISI 316 Ti
Příloha J	Výpočet úkosu vnější rovinné plochy u vzorků z titanu Grade 2
Příloha K	Výpočet úkosu vnější rovinné plochy u vzorků z hliníkové slitiny AlMgSi
Příloha L	Výpočet úkosu vnější rovinné plochy vzorků z konstrukční oceli S355J0

Příloha A

Naměřené hodnoty u vzorků z nerezové oceli AISI 316 Ti

Nerezová ocel AISI 316 Ti								
Označení vzorku	Kvalita řezné plochy Q	Zapnutí korekčních systémů	Hmotnostní průtok abraziva	Maximální rychlost řezání	Celkový čas v desetinném formátu	Ra horní	Ra dolní	Průměrná rychlost řezání
			g.min ⁻¹	mm.min ⁻¹	s	μm	μm	mm.min ⁻¹
1	5	Ano	200	67,5	2,567	3,794	5,768	45
2	5	Ano	300	79,2	2,233	3,853	4,945	52
3	5	Ano	400	88,8	2	3,83	5,305	58
4	5	Ne	200	67,5	3,267	3,894	6,225	36
5	5	Ne	300	79,2	2,817	4,018	5,559	41
6	5	Ne	400	88,8	2,533	4,017	6,145	46
7	4	Ano	200	87,3	1,8	3,897	6,81	64
8	4	Ano	300	102,4	1,55	3,813	6,466	75
9	4	Ano	400	114,7	1,417	3,6	5,723	82
10	4	Ne	200	87,3	2,15	3,772	6,201	54
11	4	Ne	300	102,4	1,867	3,852	6,046	62
12	4	Ne	400	114,7	1,7	3,522	6,223	68
13	3	Ano	200	121,5	1,283	3,954	10,596	90
14	3	Ano	300	142,6	1,133	3,727	8,362	102
15	3	Ano	400	159,7	1,017	3,692	8,681	114
16	3	Ne	200	121,5	1,533	3,946	11,411	76
17	3	Ne	300	142,6	1,35	3,509	7,793	86
18	3	Ne	400	159,7	1,233	3,727	7,701	94
19	2	Ano	200	193,7	0,983	4,346	26,155	118
20	2	Ano	300	227,3	0,867	4,733	15,208	134
21	2	Ano	400	254,6	0,8	4,708	18,217	145
22	2	Ne	200	193,7	1,233	4,831	19,136	94
23	2	Ne	300	227,3	1,1	4,741	12,582	105
24	2	Ne	400	254,6	1	4,331	13,16	116

Příloha B

Naměřené hodnoty u vzorků z titanu Grade 2

Titan Grade 2								
Označení vzorku	Kvalita řezné plochy Q	Zapnutí korekčních systémů	Hmotnostní průtok abraziva	Maximální rychlost řezání	Celkový čas v desetinném formátu	Ra horní	Ra dolní	Průměrná rychlost řezání
			g.min ⁻¹	mm.min ⁻¹	s	μm	μm	mm.min ⁻¹
1	4	Ano	200	132,5	1,25	4,64	9,08	93
2	4	Ano	300	155,5	1,083	4,412	8,451	107
3	4	Ano	400	174,2	1	4,621	8,899	116
4	4	Ne	200	132,5	1,433	4,833	9,785	81
5	4	Ne	300	155,5	1,3	4,878	7,903	89
6	4	Ne	400	174,2	1,217	5,182	7,33	95

Příloha C

Naměřené hodnoty u vzorků z hliníkové slitiny AlMgSi

Hliníková slitina AlMgSi								
Označení vzorku	Kvalita řezné plochy Q	Zapnutí korekčních systémů	Hmotnostní průtok abraziva	Maximální rychlost řezání	Celkový čas v desetinném formátu	Ra horní	Ra dolní	Průměrná rychlost řezání
			g.min ⁻¹	mm.min ⁻¹	s	μm	μm	mm.min ⁻¹
1	4	Ano	200	279,4	0,7	6,312	10,615	166
2	4	Ano	300	327,8	0,617	6,608	9,463	188
3	4	Ano	400	367,2	0,583	7,259	9,994	199
4	4	Ne	200	279,4	0,8	6,202	10,349	145
5	4	Ne	300	327,8	0,716	6,714	9,632	162
6	4	Ne	400	367,2	0,65	6,397	9,6	178

Příloha D

Naměřené hodnoty u vzorků z konstrukční oceli S355J0

Konstrukční ocel S355J0								
Označení vzorku	Kvalita řezné plochy Q	Zapnutí korekčních systémů	Hmotnostní průtok abraziva	Maximální rychlost řezání	Celkový čas v desetinném formátu	Ra horní	Ra dolní	Průměrná rychlost řezání
			g.min ⁻¹	mm.min ⁻¹	s	μm	μm	mm.min ⁻¹
1	4	Ano	200	89,8	1,733	5,176	7,211	67
2	4	Ano	300	105,4	1,517	4,665	6,042	76
3	4	Ano	400	118	1,367	4,574	6,64	85
4	4	Ne	200	89,8	2,1	4,489	7,239	55
5	4	Ne	300	105,4	1,817	4,428	6,552	64
6	4	Ne	400	118	1,634	4,561	6,351	71

Příloha E

Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy u vzorků z nerezové oceli AISI 316 Ti

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	10,06	10,03	10,11	10,11	10,12	10,04	10,07	9,86	10,13	9,83	10,09	9,8
2. měření	10,08	10,07	10,05	10,06	10,08	10,06	10,04	9,84	10,09	9,86	10,045	9,82
3. měření	10,06	10,08	10,045	10,05	10,09	10,05	10,02	9,91	10,12	9,92	10,02	9,85
4. měření	10,09	10,04	10,04	10,04	10,09	10,09	10	9,93	10,07	9,93	10,04	9,89
5. měření	10,085	10,07	10,045	10,06	10,1	10,12	10,02	9,89	10,09	9,89	10,03	9,88
6. měření	10,09	10,08	10,12	10,09	10,11	10,08	10,04	9,9	10,08	9,91	10,05	9,87
7. měření	10,06	10,06	10,11	10,07	10,14	10,07	10,06	9,85	10,08	9,86	10,08	9,86
8. měření	10,07	10,05	10,11	10,05	10,07	10,05	10,04	9,84	10,07	9,85	10,03	9,81
9. měření	10,05	10,06	10,085	10,04	10,11	10,04	10,04	9,88	10,07	9,85	10,04	9,83
10. měření	10,07	10,03	10,07	10,03	10,08	10,03	10,02	9,86	10,06	9,83	10,06	9,81
Prům. hodnota	10,07	10,06	10,08	10,06	10,10	10,06	10,04	9,88	10,09	9,87	10,05	9,84
Úkos [°]	0° 3'		0° 3'		0° 6'		0° 27'		0° 37'		0° 36'	

1. pokračování

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	7		8		9		10		11		12	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	10,38	10,47	10,38	10,4	10,38	10,47	10,09	9,9	10,08	9,91	10,09	9,87
2. měření	10,3	10,4	10,33	10,38	10,35	10,46	10,02	9,95	10,06	9,94	10,07	9,89
3. měření	10,32	10,39	10,32	10,42	10,32	10,38	10,03	9,92	10,04	9,95	10,04	9,91
4. měření	10,35	10,41	10,34	10,41	10,33	10,39	10,07	9,9	10,08	9,92	10,04	9,94
5. měření	10,29	10,42	10,33	10,39	10,34	10,42	10,09	9,93	10,07	9,85	10,13	9,94
6. měření	10,35	10,35	10,36	10,44	10,31	10,37	10,09	9,94	10,08	9,9	10,11	9,95
7. měření	10,37	10,4	10,3	10,43	10,34	10,46	10,08	9,9	10,06	9,92	10,09	9,93
8. měření	10,38	10,45	10,37	10,39	10,36	10,42	10,03	9,95	10,09	9,88	10,06	9,88
9. měření	10,36	10,4	10,4	10,43	10,38	10,39	10,04	9,96	10,06	9,89	10,07	9,89
10. měření	10,39	10,46	10,41	10,42	10,35	10,43	10,06	9,93	10,09	9,9	10,09	9,91
Prům. hodnota	10,35	10,42	10,35	10,41	10,35	10,42	10,06	9,93	10,07	9,91	10,08	9,91
Úkos [°]	-0° 11'		-0° 10'		-0° 13'		0° 23'		0° 28'		0° 29'	

2. pokračování

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	13		14		15		16		17		18	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	10,27	10,35	10,25	10,47	10,26	10,38	10,04	9,95	10,01	9,85	10,01	9,85
2. měření	10,22	10,42	10,21	10,43	10,24	10,35	10,01	9,96	10	9,87	10,01	9,88
3. měření	10,19	10,37	10,21	10,35	10,27	10,36	10,03	9,94	10,03	9,86	10,02	9,81
4. měření	10,24	10,27	10,29	10,38	10,29	10,31	10,04	9,93	10,01	9,92	10	9,9
5. měření	10,31	10,42	10,32	10,35	10,33	10,24	10,02	9,87	10,06	9,78	10,04	9,88
6. měření	10,3	10,36	10,35	10,32	10,25	10,45	10,01	9,88	10,06	9,79	10,03	9,89
7. měření	10,31	10,38	10,28	10,4	10,27	10,38	10,05	9,92	10,04	9,85	10,01	9,8
8. měření	10,28	10,34	10,26	10,39	10,26	10,45	10,04	9,93	10,01	9,88	10,03	9,88
9. měření	10,27	10,39	10,25	10,32	10,28	10,38	10,03	9,94	10,02	9,9	10,02	9,9
10. měření	10,28	10,41	10,28	10,35	10,25	10,39	10,02	9,91	10	9,89	10,01	9,86
Prům. hodnota	10,27	10,37	10,27	10,38	10,27	10,37	10,03	9,92	10,02	9,86	10,02	9,87
Úkos [°]	-0° 18'		-0° 18'		-0° 17'		0° 18'		0° 28'		0° 26'	

3. pokračování

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	19		20		21		22		23		24	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	10,16	10,53	10,37	10,57	10,35	10,54	10,05	9,92	10,01	9,85	10,01	9,84
2. měření	10,15	10,32	10,34	10,65	10,3	10,53	10,03	9,95	10,02	9,83	10,03	9,9
3. měření	10,21	10,47	10,42	10,57	10,29	10,37	10,01	9,97	10,05	9,82	10,06	9,94
4. měření	10,23	10,03	10,4	10,15	10,38	10,44	10	9,85	10,04	9,88	10,05	9,93
5. měření	10,26	10,43	10,45	10,63	10,42	10,13	10,03	9,95	10,03	9,91	10,04	9,98
6. měření	10,19	10,4	10,38	10,57	10,37	10,67	10,04	9,99	10,02	9,92	10,07	9,8
7. měření	10,22	10,51	10,4	10,49	10,38	10,61	10,02	9,98	10,02	9,9	10,05	9,74
8. měření	10,21	10,48	10,39	10,53	10,35	10,54	10,01	9,93	10,03	9,92	10,03	10,01
9. měření	10,17	10,31	10,41	10,52	10,34	10,55	10,01	10,04	10,01	9,97	10,02	9,99
10. měření	10,15	10,16	10,39	10,63	10,37	10,45	10,03	10,08	10,02	9,93	10,03	9,99
Prům. hodnota	10,20	10,36	10,40	10,53	10,36	10,48	10,02	9,97	10,03	9,89	10,04	9,91
Úkos [°]	-0° 29'		-0° 23'		-0° 22'		0° 10'		0° 23'		0° 22'	

Příloha F

Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy u vzorků z titanu Grade 2

Titan Grade 2												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	9,98	10,2	10,01	10,2	10,01	10,17	10,01	9,87	10,03	9,86	9,98	9,78
2. měření	9,88	10,15	9,93	10,22	9,95	10,07	10,02	9,85	10,09	9,83	9,97	9,8
3. měření	9,95	10,23	9,95	10,12	9,98	10,09	10	9,88	10,04	9,84	10,01	9,9
4. měření	10,01	10,22	9,98	10,05	9,99	10,12	9,97	9,83	10,02	9,86	10,04	9,81
5. měření	10,03	10,1	9,99	10,19	10,03	10,04	10,05	9,89	10,01	9,88	9,99	9,83
6. měření	10,07	10,12	10,04	10,08	9,99	10,08	9,98	9,91	9,99	9,86	9,99	9,78
7. měření	10	10,14	10	10,11	9,99	10,14	9,97	9,91	10,05	9,87	10,04	9,81
8. měření	10,03	10,08	10,01	10,16	9,95	10,12	9,97	9,92	10,07	9,84	10	9,81
9. měření	10,03	10,23	10	10,15	9,95	10,18	10	9,89	10,04	9,87	10,01	9,85
10. měření	9,97	10,16	9,98	10,08	9,98	10,1	9,98	9,88	10	9,83	10,02	9,8
Prům. hodnota	10,00	10,16	9,99	10,14	9,98	10,11	10,00	9,88	10,03	9,85	10,01	9,82
Úkos [°]	-0° 29'		-0° 25'		-0° 22'		0° 19'		0° 31'		0° 32'	

Příloha G

Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy u vzorků z hliníkové slitiny AlMgSi

Hliníková slitina AlMgSi												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	9,98	10,05	9,95	10,02	9,97	10,1	9,88	9,67	9,93	9,72	9,91	9,71
2. měření	9,99	9,99	10,02	9,94	9,99	10,07	9,85	9,75	9,92	9,74	9,87	9,72
3. měření	9,97	9,97	10,03	10,01	9,97	10,06	9,86	9,8	9,87	9,79	9,85	9,79
4. měření	9,93	9,92	9,99	9,98	10	10,05	9,95	9,79	9,9	9,83	9,89	9,74
5. měření	10,01	9,89	9,98	10,04	10,05	10	9,93	9,76	9,93	9,74	9,94	9,73
6. měření	9,98	9,93	10	10,03	10,02	10,02	9,9	9,71	9,99	9,76	10,01	9,74
7. měření	9,97	10	9,98	10,1	10,01	10,03	9,88	9,75	10	9,73	9,9	9,76
8. měření	9,96	10,04	9,99	9,99	10,05	10,05	9,9	9,74	9,97	9,71	9,95	9,78
9. měření	9,99	9,92	9,98	9,98	10,01	10,02	9,88	9,76	9,96	9,75	9,93	9,73
10. měření	10,01	9,94	9,99	9,97	10	10,09	9,91	9,79	9,94	9,76	9,88	9,69
Prům. hodnota	9,98	9,97	9,99	10,01	10,01	10,05	9,89	9,75	9,94	9,75	9,91	9,74
Úkos [°]	0° 2'		-0° 3'		-0°17'		0° 24'		0° 32'		0° 30'	

Příloha H

Výpočet úkosu vnitřní kruhové plochy vzorků z konstrukční oceli S355JO

Konstrukční ocel S355JO												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	9,85	9,94	10,03	10,08	9,91	9,98	9,9	9,72	9,93	9,63	9,98	9,71
2. měření	9,8	9,86	9,98	10,11	9,92	9,99	9,92	9,77	9,95	9,73	9,92	9,78
3. měření	9,86	9,91	10	10,01	9,96	10,05	9,87	9,8	9,97	9,7	9,94	9,81
4. měření	9,97	9,89	10,03	10,05	10,06	10,03	9,92	9,77	9,92	9,75	9,94	9,83
5. měření	9,98	9,98	10,04	9,99	10,07	10,02	9,98	9,74	9,99	9,73	9,99	9,72
6. měření	9,97	9,99	10,05	10,04	9,97	10	9,97	9,66	10,03	9,78	9,98	9,81
7. měření	9,9	10	10,03	10,1	9,96	10,09	9,98	9,78	10,02	9,8	9,98	9,76
8. měření	9,85	9,94	10,02	10,09	9,9	10,04	9,94	9,71	9,95	9,83	9,95	9,77
9. měření	9,83	9,91	9,99	10,01	9,89	9,97	9,9	9,73	9,93	9,73	9,98	9,74
10. měření	9,81	9,93	9,98	10,13	9,9	9,98	9,87	9,73	9,95	9,72	9,99	9,72
Prům. hodnota	9,88	9,94	10,02	10,06	9,95	10,02	9,93	9,74	9,96	9,74	9,97	9,77
Úkos [°]	-0° 9'		-0° 8'		-0° 10'		0° 32'		0° 39'		0° 34'	

Příloha I

Výpočet úkosu vnější rovinné plochy u vzorků z nerezové oceli AISI 316 Ti

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	15,04	15,08	15,04	15,05	15,01	15,05	14,95	15,09	14,88	15,04	14,9	15,04
2. měření	15,05	15,08	15,02	15,05	14,99	15,06	14,98	15,2	14,94	15,2	14,99	15,24
3. měření	15,02	15,06	15	15,04	14,98	15,04	15,01	15,25	14,93	15,23	14,92	15,24
4. měření	15,02	15,06	15,01	15,01	14,99	15,05	14,99	15,25	14,92	15,22	14,94	15,24
5. měření	15,02	15,05	14,98	15,03	14,96	15,04	15	15,25	14,95	15,22	14,94	15,24
6. měření	15	15,04	14,98	15,02	14,96	15,02	14,98	15,24	14,92	15,23	14,95	15,24
7. měření	15,01	15,04	14,97	15,01	14,96	15,02	14,99	15,21	14,92	15,24	14,97	15,24
8. měření	15	15,02	14,98	15,03	14,97	15,04	14,98	15,12	14,91	15,22	14,91	15,21
9. měření	15,01	15,04	14,97	15,03	14,97	15,02	14,95	15,07	14,91	15,11	14,96	15,07
10. měření	15,01	15,04	14,98	15,02	14,98	15,02	14,92	15,05	14,86	15,04	14,89	15,01
Prům. hodnota	15,02	15,05	14,99	15,03	14,98	15,04	14,98	15,17	14,91	15,18	14,94	15,18
Úkos [°]	0° 6'		0° 6'		0° 10'		0° 34'		0° 45'		0° 41'	

1. pokračování

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	7		8		9		10		11		12	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	14,73	14,71	14,7	14,66	14,74	14,74	14,89	15,08	14,83	15,06	14,9	15,09
2. měření	14,71	14,7	14,69	14,67	14,69	14,71	14,94	15,2	14,89	15,14	14,96	15,21
3. měření	14,7	14,68	14,68	14,64	14,69	14,67	14,92	15,24	14,9	15,21	14,94	15,25
4. měření	14,72	14,66	14,67	14,63	14,67	14,68	14,93	15,24	14,92	15,21	14,96	15,24
5. měření	14,72	14,67	14,68	14,68	14,68	14,66	14,95	15,23	14,92	15,21	14,92	15,24
6. měření	14,71	14,67	14,69	14,65	14,66	14,66	14,94	15,24	14,91	15,19	14,94	15,24
7. měření	14,67	14,68	14,66	14,66	14,66	14,66	14,94	15,24	14,91	15,19	14,94	15,24
8. měření	14,69	14,68	14,67	14,64	14,65	14,65	14,95	15,16	14,91	15,18	14,93	15,23
9. měření	14,69	14,69	14,67	14,65	14,68	14,68	14,95	15,11	14,84	15,1	14,9	15,19
10. měření	14,74	14,68	14,7	14,65	14,7	14,66	14,9	15,09	14,84	15,06	14,88	15,08
Prům. hodnota	14,71	14,68	14,68	14,65	14,68	14,68	14,93	15,18	14,89	15,16	14,93	15,20
Úkos [°]	-0° 4'		-0° 5'		-0° 1'		0° 43'		0° 47'		0° 48'	

2. pokračování

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	13		14		15		16		17		18	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	14,76	14,76	14,75	14,73	14,74	14,72	14,95	15,24	14,93	15,16	14,91	15,18
2. měření	14,74	14,77	14,72	14,72	14,71	14,72	14,96	15,31	14,94	15,25	14,95	15,28
3. měření	14,73	14,82	14,73	14,67	14,72	14,7	14,96	15,38	14,95	15,3	14,96	15,33
4. měření	14,75	14,72	14,71	14,68	14,73	14,7	14,96	15,36	14,97	15,31	14,93	15,33
5. měření	14,73	14,71	14,7	14,7	14,69	14,71	14,95	15,33	14,95	15,29	14,94	15,31
6. měření	14,72	14,72	14,7	14,67	14,72	14,7	14,95	15,32	14,93	15,31	14,94	15,3
7. měření	14,72	14,72	14,71	14,68	14,72	14,72	14,95	15,33	14,94	15,29	14,93	15,32
8. měření	14,72	14,72	14,69	14,68	14,71	14,72	14,92	15,25	14,94	15,29	14,93	15,31
9. měření	14,73	14,7	14,68	14,71	14,72	14,7	14,94	15,19	14,93	15,18	14,9	15,26
10. měření	14,74	14,73	14,71	14,71	14,7	14,71	14,94	15,18	14,9	15,15	14,91	15,17
Prům. hodnota	14,73	14,74	14,71	14,70	14,72	14,71	14,95	15,29	14,94	15,25	14,93	15,28
Úkos [°]	0° 1'		-0° 2'		-0° 1'		0° 49'		0° 54'		1°	

3. pokračování

Nerezová ocel AISI 316 Ti												
Vzorek	19		20		21		22		23		24	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	14,87	14,84	14,67	14,68	14,66	14,73	14,93	15,27	14,91	15,24	14,9	15,22
2. měření	14,89	14,91	14,7	14,73	14,69	14,76	14,98	15,34	14,92	15,34	14,94	15,32
3. měření	14,84	14,95	14,68	14,76	14,7	14,78	14,94	15,46	14,93	15,4	14,96	15,44
4. měření	14,87	14,91	14,69	14,72	14,69	14,81	14,96	15,53	14,98	15,52	14,98	15,46
5. měření	14,86	14,93	14,66	14,71	14,68	14,79	14,93	15,52	14,96	15,55	14,94	15,48
6. měření	14,82	14,93	14,66	14,72	14,68	14,76	14,93	15,52	14,96	15,46	14,96	15,49
7. měření	14,82	14,89	14,66	14,77	14,69	14,68	14,96	15,44	14,96	15,38	14,93	15,4
8. měření	14,82	14,95	14,66	14,72	14,67	14,81	14,92	15,35	14,98	15,34	14,91	15,33
9. měření	14,87	14,87	14,65	14,7	14,69	14,72	14,93	15,25	14,94	15,23	14,89	15,22
10. měření	14,8	14,91	14,65	14,69	14,66	14,72	14,92	15,27	14,95	15,23	14,89	15,24
Prům. hodnota	14,85	14,91	14,67	14,72	14,68	14,76	14,94	15,40	14,95	15,37	14,93	15,36
Úkos [°]	0° 11'		9°		0° 13'		1° 18'		1° 12'		1° 14'	

Příloha J

Výpočet úkosu vnější rovinné plochy u vzorků z titanu Grade 2

Titan Grade 2												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	15,09	14,99	15,08	14,95	15,03	15,01	15	15,23	14,92	15,16	14,91	15,2
2. měření	15,09	14,99	15,05	14,97	15,02	14,97	15	15,4	14,94	15,37	14,97	15,36
3. měření	15,06	14,98	15,01	14,98	15,03	14,98	15	15,41	14,95	15,38	15,03	15,37
4. měření	15,01	14,98	15	14,99	15,04	14,99	15	15,38	14,96	15,36	14,96	15,4
5. měření	15,07	15	15,03	14,98	15,03	14,98	14,98	15,39	15	15,35	15,01	15,39
6. měření	15,06	14,94	15,03	15	15,06	14,97	14,99	15,37	14,98	15,37	15	15,36
7. měření	15,07	14,98	15,03	14,97	15,04	14,97	14,98	15,38	14,96	15,36	15,03	15,37
8. měření	15,05	14,97	15,02	15	15,07	14,94	14,97	15,23	14,91	15,24	15	15,3
9. měření	15,06	15	15,02	15	15,06	14,98	14,92	15,2	14,88	15,18	14,95	15,24
10. měření	15,08	14,95	15,05	14,98	15,05	14,98	14,95	15,18	14,92	15,16	14,94	15,18
Prům. hodnota	15,06	14,98	15,03	14,98	15,04	14,98	14,98	15,32	14,94	15,29	14,98	15,32
Úkos [°]	-0° 15'		-0° 9'		-0° 11'		0° 58'		1°		0° 58'	

Příloha K

Výpočet úkosu vnější rovinné plochy u vzorků z hliníkové slitiny AlMgSi

Hliníková slitina AlMgSi												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	15,09	15,15	15,05	15,13	15,11	15,17	15,05	15,24	15,05	15,21	15,06	15,24
2. měření	15,1	15,15	15,14	15,11	15,07	15,16	15,1	15,35	15,11	15,34	15,11	15,38
3. měření	15,07	15,15	15,04	15,09	15,06	15,15	15,12	15,39	15,13	15,4	15,14	15,41
4. měření	15,07	15,12	15,04	15,09	15,06	15,15	15,13	15,41	15,17	15,38	15,12	15,4
5. měření	15,08	15,12	15,03	15,1	15,05	15,13	15,14	15,41	15,09	15,37	15,12	15,39
6. měření	15,05	15,13	15,03	15,08	15,07	15,13	15,14	15,41	15,05	15,36	15,12	15,4
7. měření	15,07	15,13	15,02	15,08	15,05	15,15	15,11	15,4	15,09	15,37	15,09	15,37
8. měření	15,06	15,11	15,03	15,09	15,06	15,16	15,09	15,3	15,1	15,39	15,08	15,31
9. měření	15,07	15,1	15,04	15,11	15,07	15,16	15,07	15,21	15,04	15,28	15,03	15,26
10. měření	15,08	15,12	15,02	15,1	15,07	15,16	15,03	15,23	15,03	15,22	15,02	15,21
Prům. hodnota	15,07	15,13	15,04	15,10	15,07	15,15	15,10	15,34	15,09	15,33	15,09	15,34
Úkos [°]	0° 9'		0° 9'		0° 15'		0° 41'		0° 42'		0° 43'	

Příloha L

Výpočet úkosu vnější rovinné plochy vzorků z konstrukční oceli S355JO

Konstrukční ocel S355JO												
Vzorek	1		2		3		4		5		6	
Měřená oblast	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
1. měření	15,08	15,02	14,95	14,92	14,84	14,79	14,88	15,08	14,93	15,03	14,9	15,11
2. měření	15,07	15,02	14,93	14,88	14,82	14,76	14,87	15,15	14,93	15,16	14,94	15,24
3. měření	15,07	14,99	14,93	14,88	14,82	14,77	14,9	15,17	14,93	15,17	14,98	15,3
4. měření	15,04	14,98	14,94	14,87	14,81	14,75	14,9	15,14	14,87	15,19	15	15,3
5. měření	15,03	14,97	14,93	14,87	14,8	14,76	14,88	15,14	14,87	15,16	15,03	15,3
6. měření	15	14,96	14,93	14,88	14,84	14,78	14,86	15,14	14,87	15,17	14,99	15,28
7. měření	15	14,97	14,93	14,85	14,83	14,77	14,82	15,13	14,89	15,17	15,01	15,29
8. měření	15	14,95	14,93	14,86	14,84	14,78	14,85	15,09	14,82	15,1	15	15,27
9. měření	14,98	14,94	14,92	14,88	14,87	14,8	14,79	15,02	14,81	15	14,97	15,13
10. měření	14,98	14,95	14,91	14,87	14,9	14,82	14,8	14,99	14,81	14,99	14,96	15,13
Prům. hodnota	15,03	14,98	14,93	14,88	14,84	14,78	14,86	15,11	14,87	15,11	14,98	15,24
Úkos [°]	-0° 9'		-0° 9'		-0° 10'		0° 43'		0° 41'		0° 44'	

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.